



# Inversion des mesures radiométriques haute-fréquence au-dessus des surfaces continentales

Fatima Karbou

## ► To cite this version:

Fatima Karbou. Inversion des mesures radiométriques haute-fréquence au-dessus des surfaces continentales. Physique [physics]. Université de Versailles-Saint Quentin en Yvelines, 2004. Français. NNT: . tel-00008148

**HAL Id: tel-00008148**

**<https://theses.hal.science/tel-00008148>**

Submitted on 20 Jan 2005

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

*Université de Versailles Saint Quentin en Yvelines*

THÈSE

*Pour l'obtention du Diplôme de*

***DOCTEUR DE L' UNIVERSITE DE VERSAILLES SAINT QUENTIN EN  
YVELINES***

*Spécialité: Méthodes Physiques en Télédétection*

Fatima KARBOU

**Inversion des mesures radiométriques haute fréquence au  
dessus des surfaces continentales**

*Soutenue le 25 novembre 2004, devant le jury suivant :*

Jean Christophe CALVET

Rapporteur

Vincent CASSE

Examineur

Gérard CAUDAL

Examineur

Laurence EYMARD

Directrice de thèse

Christian MÄTZLER

Rapporteur

Estelle OBLIGIS

Membre invité

Juan PARDO

Membre invité

Catherine PRIGENT

Co-directrice de thèse

## REMERCIEMENTS

Ce travail de thèse a été entièrement réalisé au Centre d'Etude des Environnements Terrestre et Planétaires (CETP) avec le soutien financier du CNRS et de la société « Collecte Localisation Satellite » (CLS).

Je tiens à remercier très chaleureusement ma directrice de thèse **Laurence Eymard** pour son soutien permanent tout au long de ma thèse et pour son souci constant de l'avancement de mes travaux. Elle a toujours su me conseiller et m'aider par son enthousiasme et sa détermination.

Je tiens également à exprimer ma plus profonde reconnaissance à ma co-directrice de thèse **Catherine Prigent** qui a suivi mes travaux avec beaucoup d'enthousiasme et de dynamisme. Je lui suis reconnaissante pour avoir su me soutenir et me motiver tout au long de la thèse.

J'ai énormément appris au contact de mes deux directrices de thèse grâce à qui je garde de très bons souvenirs de toute cette période.

Le présent travail est le résultat de collaborations directes et indirectes avec plusieurs personnes avec qui j'ai beaucoup appris. J'aimerais d'abord vivement remercier **Juan Pardo** qui m'a beaucoup aidé en fournissant généreusement son modèle de transfert radiatif et également beaucoup de son temps. Je tiens également à remercier très chaleureusement **Filipe Aires** qui a su me faire profiter de sa grande expérience en inversion neuronale. J'ai beaucoup apprécié des discussions instructives avec **Frederic Chevallier** autour de l'assimilation des données et de l'étalonnage d'instruments satellitaires.

Je remercie **Jean Christophe Calvet** et **Christian Matzler**, rapporteurs de cette thèse, pour leurs lectures approfondies et leurs remarques pertinentes. Je remercie vivement **Vincent Cassé**, **Gérard Caudal** et **Estelle Obligis** pour avoir accepté de faire partie de mon jury de thèse.

Enfin, je tiens à exprimer mes meilleurs sentiments vis-à-vis de **Catherine Ottele**, **Danièle Hauser** et **Hervé Deferaudy** toujours disponibles et à l'écoute. Je tiens aussi à remercier **Michel Desbois** qui est à l'origine de ma venue au CETP, et l'ensemble du personnel des départements IOTA et ABM avec qui j'ai pu avoir des échanges cordiaux et chaleureux.

Beaucoup d'autres personnes au CETP, que je n'ai pas cité, méritent d'être remerciées pour leur aide et leur efficacité à différents niveaux que ce soit informatique ou administratif.

*Enfin au moment de finaliser mon rapport de thèse, j'ai une tendre pensée pour tous mes proches et amis à la fois au Maroc et en France pour leurs soutiens et encouragements permanents. Je pense tout particulièrement à Guillaume.*

## Résumé :

*Le principal objectif de ce travail de thèse est d'étudier la faisabilité de restitution des profils atmosphériques de température et d'humidité au-dessus des surfaces continentales à partir des mesures des sondeurs micro-onde passives et principalement des mesures AMSU-A et -B.*

*En effet, si les mesures AMSU sont assimilées de façon opérationnelle au-dessus des océans, elles restent cependant, insuffisamment exploitées au-dessus des continents. L'émissivité des continents est souvent élevée (proche de 1.0) et très variable avec les caractéristiques de la surface. Par conséquent, il est difficile de séparer les contributions relatives de la surface et de l'atmosphère aux rayonnements mesurés par les capteurs satellites.*

*Pour cette raison, une partie importante de ce travail a été consacrée à l'estimation de l'émissivité de surface aux fréquences AMSU (23-150 GHz) et aux angles d'observation de ces instruments (de  $-58^\circ$  à  $+58^\circ$  par rapport au nadir). Les calculs de l'émissivité de surface ont été menés sur le globe en utilisant les données non nuageuses de l'année 2000.*

*Les émissivités AMSU ainsi obtenues ont été évaluées en examinant leurs dépendances angulaires et spectrales et par comparaison aux émissivités SSM/I.*

*Toutes ces analyses ont permis le développement d'une paramétrisation de l'émissivité de surface valable pour des fréquences allant de 23 à 150 GHz et pour des angles d'observation satellite pouvant atteindre  $58^\circ$ .*

*Par la suite et avec une bonne connaissance de la surface (émissivité et température de surface), la faisabilité de l'inversion des profils de température et d'humidité atmosphériques à partir des observations AMSU a été étudiée en réalisant une étude de contenu en information. Cette étude a montré que les mesures issues des instruments AMSU quand elles sont combinées avec des estimations fiables de l'émissivité et de la température de surface, permettent l'amélioration des restitutions de température et d'humidité atmosphériques surtout dans les basses couches.*

## Abstract :

*The main objective of this thesis is to study the potential and the feasibility of atmospheric temperature and humidity profile retrievals over land using microwave sounding measurements and especially AMSU-A and-B ones.*

*Indeed, microwave measurements are assimilated over oceans in many meteorological centres but remain insufficiently exploited over land. The land emissivity is high (almost close to 1.0) and is highly variable with surface characteristics. Consequently, it is difficult to separate the relative contributions of the surface and the atmosphere to the measured radiances.*

*An important part of this work has been dedicated to the land emissivity estimation at AMSU frequencies (23-150 GHz) and scanning conditions (from  $-58^{\circ}$  to  $+58^{\circ}$  with respect to nadir). The land emissivity calculations have been conducted over the globe and using cloud free data from year 2000.*

*The land AMSU emissivities have been evaluated by examining their angular and spectral dependences and by comparison to SSM/I emissivities.*

*Theses analyses permit the development of a microwave land emissivity parameterization for frequencies ranging from 23 to 150 GHz and scanning angles up to  $58^{\circ}$ .*

*Thereafter and with a good knowledge of the surface (emissivity and skin temperature), the feasibility of the AMSU temperature and humidity profiles has been studied by conducting an information content analysis. This study shows that AMSU measurements when combined with a reliable surface emissivity and skin temperature could produce valuable estimations of the atmospheric temperature and humidity profiles especially at atmospheric low levels.*

## Table des matières

|          |  |           |
|----------|--|-----------|
|          | <b>INTRODUCTION</b>  | <b>5</b>  |
| <b>2</b> | <b>LES INSTRUMENTS MICRO-ONDE</b>                          | <b>9</b>  |
|          | 2.1. GENERALITES   | 9         |
|          | 2.2. LES INSTRUMENTS AMSU                                  | 12        |
|          | 2.2.1. DESCRIPTION GENERALE                                | 12        |
|          | 2.2.2. LES CARACTERISTIQUES DES INSTRUMENTS AMSU           | 14        |
|          | 2.3. BASES DE DONNEES ADDITIONNELLES                       | 17        |
|          | 2.3.1. LA CLIMATOLOGIE DES NUAGES ISCCP                    | 17        |
|          | 2.3.2. LES PROFILS DE TEMPERATURE ET D' HUMIDITE ERA40     | 17        |
|          | 2.3.3. LA CLASSIFICATION DE VEGETATION                     | 18        |
| <b>3</b> | <b>RADIOMETRIE MICRO-ONDE</b>                              | <b>21</b> |
|          | 3.1. L' ABSORPTION GAZEUSE                                 | 21        |
|          | 3.2. LE DOMAINE DES HYPERFREQUENCES                        | 23        |
|          | 3.3. LE TRANSFERT RADIATIF                                 | 26        |
|          | 3.4. LES FONCTIONS DE POIDS                                | 28        |
|          | 3.5. LE MODELE DE TRANSFERT RADIATIF ATM                   | 30        |
| <b>4</b> | <b>L' EMISSIVITE DE SURFACE A PARTIR DES MESURES AMSU</b>  | <b>33</b> |
|          | 4.1. INTRODUCTION  | 33        |
|          | 4.2. SURFACE SPECULAIRE OU LAMBERTIENNE ?                  | 35        |
|          | 4.3. EXEMPLE DE CARTES MENSUELLES D' EMISSIVITE DE SURFACE | 42        |
|          | 4.4. PUBLICATION ASSOCIEE AU CHAPITRE                      | 46        |
| <b>5</b> | <b>PARAMETRISATION DE L' EMISSIVITE DE SURFACE</b>         | <b>59</b> |
|          | 5.1. INTRODUCTION  | 59        |
|          | 5.2. PUBLICATION ASSOCIEE AU CHAPITRE                      | 61        |
| <b>6</b> | <b>INVERSION DES MESURES AMSU AU DESSUS DES CONTINENTS</b> | <b>86</b> |

|          |   |            |
|----------|---|------------|
| 6.1.     | INTRODUCTION  | 86         |
| 6.2.     | PUBLICATION ASSOCIEE AU CHAPITRE  | 89         |
| <b>7</b> | <b>CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES</b>  | <b>125</b> |
| 7.1.     | Rappel des objectifs  | 125        |
| 7.2.     | Les contributions de la thèse   | 126        |
| 7.2.1.   | L'émissivité de surface   | 126        |
| 7.2.2.   | Paramétrisation de l'émissivité de surface  | 127        |
| 7.2.3.   | Profils atmosphériques de température et d'humidité à partir des observations AMSU-A et -B au-dessus des continents | 128        |
| 7.3.     | Perspectives  | 128        |
| 7.3.1.   | Assimilation des observations AMSU au-dessus des continents   | 128        |
| 7.3.2.   | Biais instrumentaux AMSU  | 130        |
| 7.3.3.   | Le Sondeur SAPHIR à bord de MAGHATROPIQUES  | 130        |
| 7.3.4.   | L'émissivité de surface : potentiel pour l'étalonnage des capteurs micro onde ?                                     | 132        |
| 7.3.5.   | Variation saisonnière de l'émissivité de surface : potentiel dans le cadre du programme AMMA ?                      | 134        |
|          | <b>BIBLIOGRAPHIE</b>  | <b>138</b> |
|          | <b>ANNEXE1</b>  | <b>142</b> |
|          | <b>ANNEXE2</b>  | <b>152</b> |



## INTRODUCTION

Les radiosondages constituent l'outil de référence pour le sondage atmosphérique de température et d'humidité. Cependant l'efficacité des radiosondages est limitée par leur faible et inhomogène distribution spatiale sur le globe et également par leur disponibilité temporelle insuffisante (généralement deux fois par jour).

Sur les 30 dernières années, plusieurs satellites d'observation de la Terre ont permis l'acquisition de données sur l'ensemble du globe pour pallier les limitations à la fois géographique et temporelle des mesures météorologiques *in situ*. A l'origine, les mesures satellitaires dans le domaine du visible et de l'infrarouge ont été préférentiellement utilisées. Cependant, les mesures dans le visible ne sont disponibles que durant le jour. En plus les observations dans le visible et l'infrarouge sont fortement atténuées par les nuages. De leur côté, les mesures micro onde ont l'avantage d'une moindre sensibilité aux nuages non précipitants par rapport aux mesures infrarouge. De ce fait, l'utilisation des mesures micro onde dans les modèles numériques de prévision du temps (NWP) peut potentiellement fournir des profils de température et d'humidité atmosphériques avec des résolutions temporelle et spatiale adéquates même par temps nuageux. En plus, les mesures micro onde peuvent être combinées aux mesures dans le visible et l'infrarouge pour une utilisation optimale de l'ensemble des mesures satellitaires disponibles et ce dans la plupart des situations atmosphériques.

Les instruments AMSU (Advanced Microwave Sounding Unit) A et B, à bord des récentes générations de satellites orbitaux polaires de la NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration), font partie des instruments micro onde capables de fournir des informations précieuses sur l'état de l'atmosphère. Avec des canaux situés autour du complexe de raies d'absorption de l'oxygène, AMSU-A est conçu pour le sondage de la température atmosphérique jusqu'à environ 45 km d'altitude depuis la surface terrestre. AMSU-B effectue des mesures à proximité de la forte raie d'absorption de vapeur d'eau à 183 GHz et est principalement destiné au sondage de la vapeur d'eau atmosphérique.

Au-dessus des océans, les mesures micro onde sont actuellement assimilées dans plusieurs modèles de prévision numériques. Cependant, au-dessus des terres, l'exploitation des données micro onde est encore insuffisante malgré les efforts déployés dans plusieurs centres de prévision du temps (*TOVS conference study*, 2003). Uniquement les canaux non sensibles à la surface terrestre sont assimilés

limitant ainsi le potentiel de sondage des instruments aux couches atmosphériques les plus élevées. Contrairement à l'émissivité de l'océan, l'émissivité de la Terre est assez élevée, souvent proche de 1. Dans ce cas, la distinction entre les contributions relatives de la surface et de l'atmosphère au signal mesuré par le satellite est assez difficile. En plus, l'émissivité des surfaces continentales varie de façon complexe en temps et en espace; elle dépend de la rugosité de la surface, de l'humidité au sol, et du couvert végétal entre autres paramètres.

Par conséquent, l'estimation de l'émissivité de surface dans le domaine micro onde est nécessaire pour une pleine exploitation des mesures hyperfréquences aux dessus des surfaces continentales. Dans le cas particulier des mesures AMSU au-dessus des continents, l'émissivité de surface doit être estimée aux fréquences d'observation des instruments en tenant compte de leur mode de balayage et de leur polarisation.

Dans ce contexte, ce travail de thèse a un double objectif : (1) d'abord ***estimer l'émissivité des surfaces continentales aux fréquences sensibles à la surface à partir des mesures AMSU-A et AMSU-B.*** Cette étape est en effet, préliminaire pour une pleine exploitation des données AMSU au-dessus des continents. Vient ensuite la deuxième finalité de ce travail et qui consiste à (2) ***développer une méthodologie pour restituer les profils de température et d'humidité au-dessus des continents en profitant d'une meilleure connaissance de l'émissivité de surface.***

Le corps principal de cette thèse se compose d'un ensemble de publications acceptées ou soumises. Cependant, afin de réduire au maximum la redondance et donner à la thèse une structure plus logique, chaque publication est combinée à une introduction pour former un chapitre cohérent.

Le chapitre 2 fournit une description des mesures AMSU qui constituent l'outil majeur de ce travail de thèse. D'autres bases de données utilisées dans le cadre du présent travail sont également décrites dans ce chapitre. Il s'agit notamment des profils de température et d'humidité issus des réanalyses ERA-40 du centre européen (ECMWF), des classifications de nuages ISCCP (International Satellite Cloud Climatology Project) et de la classification de végétation BATS (Biosphere-Atmosphere Transfer Scheme). Quelques notions de base pour la radiométrie micro-onde sont discutées dans le chapitre 3. Ces rappels sont complétés par l'annexe 1.

Le chapitre 4 présente l'étude de l'émissivité de surface aux fréquences AMSU allant de 23 à 150 GHz. L'émissivité de surface a été calculée à partir des mesures AMSU de l'année 2000, pour des angles d'observation allant de  $-58^\circ$  à  $+58^\circ$  par rapport au nadir en éliminant l'effet des nuages (à l'aide de la base de données ISCCP) et en estimant la contribution atmosphérique par calcul de transfert radiatif sur la base des profils de température et d'humidité ERA40. L'analyse de l'émissivité de surface est par la suite

conduite pour examiner ses variations spectrale et angulaire. L'extrapolation de l'émissivité aux canaux de sondage AMSU (moins sensibles à la surface) est par la suite réalisée.

Le chapitre 5 décrit une nouvelle paramétrisation de l'émissivité de surface valable dans le domaine micro onde (23-150 GHz) et qui tient compte à la fois du type de végétation et de l'angle d'observation satellite. Cette paramétrisation est basée sur l'analyse angulaire et spectrale de l'émissivité de surface précédemment calculée à partir des mesures satellitaires AMSU. La paramétrisation de l'émissivité de surface a été construite à partir d'un mois de données et évaluée sur plusieurs autres mois.

Le chapitre 6 présente une méthode de restitution des profils de température et d'humidité atmosphériques au dessus des continents à partir des observations AMSU. L'objectif étant d'étudier la faisabilité de l'inversion des mesures AMSU au-dessus des surfaces continentales en ayant une estimation réaliste de l'émissivité de surface : c'est une étude de contenu en information. Le but final étant d'étudier et de préparer l'assimilation sur continents des observations du type AMSU. L'analyse du contenu en information est basée sur une méthode statistique neuronale qui prend en entrée des informations a priori et auxiliaires. Les informations a priori sont les profils de température et d'humidité du centre européen pris 6 heures avant l'heure d'observation AMSU. Les informations auxiliaires sont l'émissivité de surface aux fréquences et aux angles d'observation AMSU ainsi que la température de surface infrarouge issue de l'ISCCP.

Le chapitre 7 récapitule l'ensemble des études réalisées dans le cadre de ce travail de thèse et fournit des conclusions et quelques perspectives.

## CHAPITRE 2

---

### LES INSTRUMENTS MICRO-ONDE

---

|          |  |          |
|----------|--|----------|
| <b>2</b> | <b>LES INSTRUMENTS MICRO-ONDE</b>                      | <b>9</b> |
| 2.1.     | GENERALITES  | 9        |
| 2.2.     | LES INSTRUMENTS AMSU                                   | 12       |
| 2.2.1.   | <i>DESCRIPTION GENERALE</i>                            | 12       |
| 2.2.2.   | <i>LES CARACTERISTIQUES DES INSTRUMENTS AMSU</i>       | 13       |
| 2.3.     | BASES DE DONNEES ADDITIONNELLES                        | 16       |
| 2.3.1.   | <i>LA CLIMATOLOGIE DES NUAGES ISCCP</i>                | 16       |
| 2.3.2.   | <i>LES PROFILS DE TEMPERATURE ET D' HUMIDITE ERA40</i> | 16       |
| 2.3.3.   | <i>LA CLASSIFICATION DE VEGETATION</i>                 | 17       |

---

## 2 LES INSTRUMENTS MICRO ONDE

---

Ce chapitre décrit sommairement les instruments satellitaires opérant dans le domaine des hyperfréquences. Une partie importante de ce chapitre est consacrée aux instruments AMSU-A et –B vu qu'ils constituent l'outil majeur de ce travail de thèse. La dernière partie de ce chapitre décrit les autres bases de données utilisées conjointement aux mesures AMSU-A et –B à différentes étapes du travail.

### 2.1. GENERALITES

Le système actuel d'observation de la Terre est composé de deux types de satellites : les géostationnaires et les polaires. Les satellites géostationnaires à orbite équatoriale de ~36 000 km d'altitude, se déplacent à la même vitesse que la Terre. Ce type de satellite permet d'obtenir des informations continues (souvent toutes les 15 minutes) sur une région spécifique de la Terre et un ensemble de plusieurs satellites du même type, assure la couverture globale de la Terre (à l'exception des zones polaires). C'est le cas par exemple des satellites METEOSAT, GOES, GMS, etc. Les instruments micro onde ne sont pour le moment embarqués que sur des satellites polaires, car mettre de tels instruments sur une orbite géostationnaire est techniquement compliqué et nécessiterait de grandes dimensions d'antennes pour avoir une bonne résolution spatiale.

Les satellites polaires ou défilants ont une orbite qui passe par les pôles et une période de révolution d'environ 102 minutes selon l'altitude. Ceci permet à chacun de ces satellites de balayer la totalité de la Terre deux fois par jour avec 14 orbites journalières en moyenne. Les satellites polaires peuvent être héliosynchrones; cela veut dire que le satellite observe une tranche de latitude donnée à la même heure locale à chaque passage montant ou descendant. Le satellite NOAA15 par exemple, traverse l'équateur à

7h30 ou à 19h30 heures locales à chaque passage montant ou descendant. Les satellites à orbite polaire passent plus fréquemment au-dessus des régions polaires par comparaison aux régions équatoriales. Ceci est dû au chevauchement de plus en plus grand entre orbites vers les pôles. La figure 2-1, montre la trace au sol à la verticale du satellite de l'ensemble des orbites du satellite NOAA15 pour le 2 février 2000.

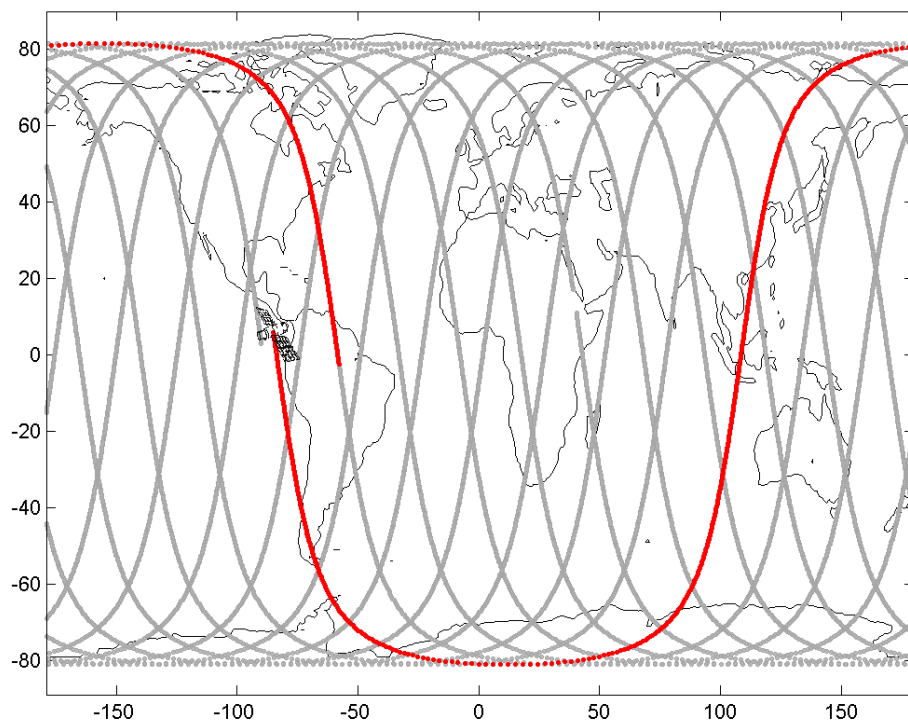


Figure 2-1: traces au nadir des orbites NOAA15 du 2 février 2000.

Les observations en hyperfréquence ont l'avantage majeur de pouvoir fournir des observations dans la plupart des situations nuageuses et peuvent être combinées aux mesures dans le domaine visible ou infrarouge pour une utilisation optimale des mesures satellitaires. Les progrès technologiques récents ont permis la conception de plateformes satellitaires qui offrent de nouvelles possibilités de mesures atmosphériques ou de surface et qui ont repoussé les limites actuelles de résolution spatiale et temporelle. Ainsi, plusieurs missions satellitaires d'observation en hyperfréquence ont été conçues ou sont planifiées. Les tableaux 2-1 et 2-2 dressent une liste non exhaustive des principales missions existantes ou futurs et les instruments micro-onde qui sont ou seront à bord.

Tableau 2-1: Liste non exhaustive d'instruments micro onde existants et prévus (from the Cooperative Institute for Meteorological Satellite Studies)

|  | AMSU-A   | AMSU-B                     | AMSR-E  | HSB                  | AMSR  | WINDSAT   | SSMIS   | MHS                            |
|--|--|----------------------------|---|----------------------|---|---|---|--------------------------------|
| Orbite /km                               | 830-870  | 830-870                    | 705   | 705                  | 803   | 830   | 830   | 830 – 870                      |
| Géométrie de balayage                    | Cross track  | Cross track                | Conical   | Cross track          | Conical   | Conical   | Conical   | Cross track                    |
| Agence et producteur                     | NOAA/ Aerojet  | NOAA/ Matra Marconi        | NASDA/ Mitsubishi                               | NASA & AEB/ INPE     | NASDA/ Mitsubishi   | US Navy & NPOESS/ NRL                                       | US DoD / Aerojet  | EUMETSAT                       |
| Fréquences GHz                           | 23.8, 31.4, 50.3, 52.8, 53.6, 54.4, 54.9, 55.5, 57.3 (6 chs), 89.0 | 89.0, 150.0, 183.3 (3 chs) | 6.925,10.65,18.7, 23.8, 36.5,89.0 (all V&H pol) | 150.0, 183.3 (3 chs) | 6.92,10.65, 18.7, 23.8, 36.5, 89.0 (all V&H pol) 50.3 and 52.8 (V only) | 6.8, 10.7, 18.7, 23.8 37.0 (10.7, 18.7 and 37 polarimetric) | 19.35(V&H), 22.24(V), 37.0 (V&H), 50.3–59.4 (H),91.66(V), 150.0(H), 183.31(H) | 89.0,157.0 183.3 (2 chs) 190.0 |
| Résolution spatiale selon les fréquences | 40 × 40 km   | 16 × 16km                  | 43×75 km 3.5×5.9 km                             | 13.5×13.5km          | 40×70 km 3×6 km   | 40×70 km 6 × 12 km  | 46×74km 13×16km   | 16×16 km                       |
| Plateforme                               | NOAA K, L,M Aqua et METOP  | NOAA K, L, M               | Aqua  | Aqua                 | ADEOS II  | DoD Coriolis  | DMSP F-16, F-17   | NOAA-N,-N' and METOP-1,-2 ,-3  |
| Date de lancement                        | May 1998   | May 1998                   | May 2002  | May 2002             | Dec. 2002   | Jan. 2003   | May 2003  | 2003 →                         |

Tableau 2-2: Liste non exhaustive d'instruments micro onde futurs (from the Cooperative Institute for Meteorological Satellite Studies)

|                       | ATMS  | CMIS   | SAPHIR        | MADRAS                                      | AQUARIUS                                   | SMOS        | EGPM   | GMI  |
|-----------------------|---|--|---------------|---|--|-------------|--|--|
| Orbite /km            | 824   | 833  | 867           | 867   | N/A  | 757         | 635  | 400  |
| Géométrie de balayage | Cross track   | Conical  | Cross track   | conical                                     | Off-nadir at 23.3°, 33.7°, 41.7° incidence | Cross track | conical  | Conical  |
| Agence et producteur  | NPOESS/ BAE systems & Aerojet                         | NPOESS/ Boeing Satellite Systems   | CNES          | CNES & ISRO/ Astrium                        | NASA                                       | ESA/ N/A    | ESA/ N/A   | NASA/ N/A                                      |
| Fréquences GHz        | 23.8, 31.4 50.3→57.3, 87.0→91.9, 164→167, 183 (5 chs) | 10.65, 18.7,36.5 (polarimetric), 50.3→59.9 (9 chs), 60.4 (5 chs),89,166, 183 (3 chs) | 183 (H) (*6 ) | 19 (V&H) 23 (V) 37 (V&H) 85 (V&H) 150 (V&H) | 1.4  | 1.4         | 18.7, 23.8, 36.5, 69.0, 157.0 (all V&H except 23.8(V)) & optionally: 10.7, 50.0 – 55.0 (4 chs), 118.75 (4 chs) | 10.65,18.7, 21.3, 37.0, 89.0 (all V&H) 183 TBD |

|  |                          |                        |                  |                        |                 |                    |                      |          |
|--|--------------------------|------------------------|------------------|------------------------|-----------------|--------------------|----------------------|----------|
| Résolution spatiale selon les fréquences | 70×70 km<br>15.8×15.8 km | 40×40 km<br>1.6×1.6 km | 11.3×13.3km      | 56km×56km<br>7.3×7.3km | <100×100km      | <50×50km           | 26×26km<br>5.5×5.5km | N/A      |
| Plateforme                               | NPP et NPOESS            | NPOESS                 | Mega - Tropiques | Mega - Tropiques       | NASA Pathfinder | ESA Earth Explorer | ESA Earth Explorer   | NASA GPM |
| Date de lancement                        | 2005 →                   | 2009 →                 | 2010             | 2010                   | 2007→           | 2007→              | 2007→                | 2008 →   |

## 2.2. LES INSTRUMENTS AMSU

### 2.2.1. DESCRIPTION GENERALE

Les sondeurs AMSU-A et AMSU-B sont embarqués à bord des dernières générations des satellites polaires de la NOAA 15, 16, 17 et depuis peu de temps sur la plateforme AQUA (voir tableau 2-3). Une nouvelle génération des instruments AMSU-A sera bientôt lancée à bord des satellites METOP. Le tableau 2-3 résume l'ensemble des plateformes satellitaires actuelles ou futures embarquant un instrument du type AMSU.

AMSU-A a été initialement conçu pour le sondage de la température atmosphérique tandis que AMSU-B est principalement destiné au sondage de l'humidité atmosphérique. Les deux instruments AMSU ont un mode de balayage transversal et mesurent instantanément le rayonnement électromagnétique émis par la Terre avec un total de vingt fréquences.

Tableau 2-3: satellites polaires embarquant des instrument du type AMSU-A et/ou AMSU-B

|   | <b>NOAA-15</b>         | <b>NOAA-16</b>     | <b>NOAA-17</b>   | <b>AQUA</b>          | <b>METOP</b>         |
|---|------------------------|--------------------|------------------|----------------------|----------------------|
| <b>Date de lancement</b>  | 13 Mai 1998            | 21 Septembre 2000  | 24 Juin 2002     | 4 Mai 2002           | 2005                 |
| <b>Altitude moyenne à l'équateur (km)</b>                                       | 850                    | 850                | 850              | 705                  | 850                  |
| <b>Noeud A: Ascendant <sup>(1)</sup></b><br><b>D: Descendant <sup>(2)</sup></b> | A : 19h30<br>D : 07h30 | A : 14h<br>D : 02h | A: 22h<br>D: 10h | A: 01h30<br>D: 13h30 | A: 09h30<br>D: 21h30 |
| <b>Période (minutes)</b>  | 101.2                  | 102.1              | 101.2            | 98.8                 | 101                  |

(1) quand le satellite traverse l'équateur en allant du sud vers le nord

(2) quand le satellite traverse l'équateur en allant du nord vers le sud



La largeur de fauchée observée par le satellite NOAA est de l'ordre de 2340 km avec une résolution de surface au nadir qui varie de 45 km pour AMSU-A à 16 km pour AMSU-B. Pour illustrer la différence de trace au sol entre les deux instruments et la fauchée du satellite, la figure 2-2 montre une trace d'orbite de NOAA15 avec des températures de brillance mesurées à la fréquence de 89 GHz commune aux deux instruments AMSU-A & -B.

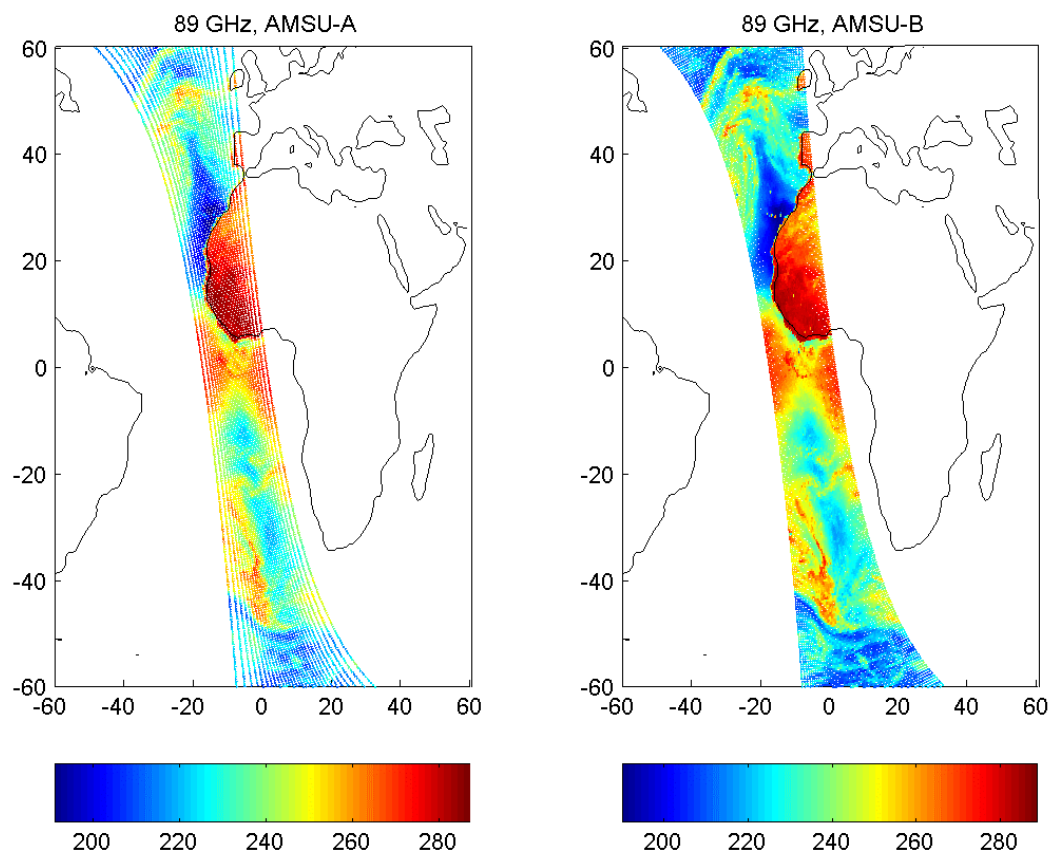


Figure 2-2: Températures de brillance pour une orbite montante de NOAA15 du 2 Février 2000, mesurées par (a) le canal 89 GHz d'AMSU-A et (b) le canal 89 GHz d'AMSU-B.

### 2.2.2. LES CARACTERISTIQUES DES INSTRUMENTS AMSU

AMSU-A possède 15 canaux (23.8-89 GHz) et a été initialement conçu pour la restitution des profils de température. Avec deux canaux fenêtres à 89 et 150 GHz et 3 canaux centrés sur la raie

d'absorption d'eau à 183.31 GHz, AMSU-B est destiné au sondage de l'humidité dans l'atmosphère (Le choix des canaux sera explicité au chapitre 3). Les deux instruments effectuent un balayage transversal et observent jusqu'à  $58^\circ$  en angle zénithal local. Le tableau 2-4 résume les caractéristiques des différents canaux AMSU et leur résolution au sol. Pour davantage de détails concernant ces instruments, le lecteur pourrait consulter (*Goodrum et al. 2000*).

L'instrument AMSU-A est composé de deux modules indépendants: AMSU-A1 et AMSU-A2. Le module AMSU-A1 dispose de deux systèmes d'antennes tandis que le module AMSU-A2 en utilise une seule. Les trois antennes sont paraboliques et effectuent des rotations complètes toutes les 8 secondes. Le cycle de rotation des antennes peut être divisé en trois étapes : (1) pendant 6 secondes, la Terre est observée à 30 positions différentes d'un angle d'observation autour du nadir (à  $\pm 48^\circ$  d'angle satellite ce qui se traduit par  $\pm 58^\circ$  d'angle zénithal local), (2) le fond cosmique est observé ainsi qu'une cible chaude interne (corps noir) pour les besoins d'étalonnage, et (3) enfin, chaque d'antenne revient à sa position initiale.

L'instrument AMSU-B possède une antenne qui lui permet d'effectuer des mesures à 5 fréquences distinctes. Comme les antennes AMSU-A, l'antenne AMSU-B est parabolique. Cependant elle effectue une rotation complète toutes les 8/3 de seconde et observent la Terre à 90 positions d'angles d'observation par rapport au nadir.

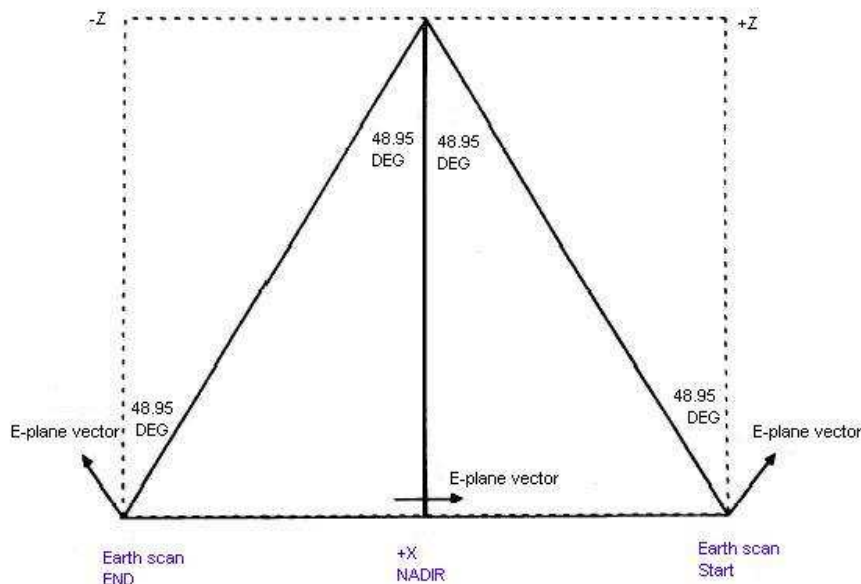


Figure 2-3: Définition de la polarisation verticale au nadir

A cause de la rotation de l'ensemble des antennes AMSU, les instruments AMSU-A et AMSU-B ont une polarisation qui dépend de l'angle d'observation. La polarisation à un angle d'observation donné est un mélange entre la polarisation horizontale et la polarisation verticale. L'angle de polarisation est défini comme étant l'angle entre le vecteur du champ électrique du rayonnement incident et la ligne d'intersection du plan perpendiculaire à la direction de propagation et le plan tangent à la surface. Tous les canaux des instruments AMSU reçoivent une polarisation linéaire (voir le tableau 2-4). Elle sera dite « verticale » au nadir (voir la figure 2-3) ou bien « horizontale » au nadir selon les canaux. Avec cette définition, le vecteur polarisé est contenu dans le plan de balayage transverse (le plan ZX selon la figure 2-3). Ce vecteur serait contenu dans le plan de déplacement s'il s'agissait d'une polarisation horizontale au nadir.

Tableau 2-4: Description des canaux AMSU-A et AMSU-B

| No du canal | Fréquences (GHz)           | Bruit instrumental (K) | Polarisation au nadir | Résolution au nadir (km) |
|-------------|----------------------------|------------------------|-----------------------|--------------------------|
| AMSU-A      |                            |                        |                       |                          |
| 1           | 23.8                       | 0.20                   | V                     | 48                       |
| 2           | 31.4                       | 0.27                   | V                     | 48                       |
| 3           | 50.3                       | 0.22                   | V                     | 48                       |
| 4           | 52.8                       | 0.15                   | V                     | 48                       |
| 5           | 53.596+/-0.115             | 0.15                   | H                     | 48                       |
| 6           | 54.4                       | 0.13                   | H                     | 48                       |
| 7           | 54.9                       | 0.14                   | V                     | 48                       |
| 8           | 55.5                       | 0.14                   | H                     | 48                       |
| 9           | 57.290= $f_0$              | 0.20                   | H                     | 48                       |
| 10          | $f_0$ +/- 0.217            | 0.22                   | H                     | 48                       |
| 11          | $f_0$ +/- 0.322 +/- 0.048  | 0.24                   | H                     | 48                       |
| 12          | $f_0$ +/- 0.322 +/- 0.022  | 0.35                   | H                     | 48                       |
| 13          | $f_0$ +/- 0.322 +/- 0.010  | 0.47                   | H                     | 48                       |
| 14          | $f_0$ +/- 0.322 +/- 0.0045 | 0.78                   | H                     | 48                       |
| 15          | 89                         | 0.11                   | V                     | 48                       |
| AMSU-B      |                            |                        |                       |                          |

|    |              |      |   |    |
|----|--------------|------|---|----|
| 16 | 89           | 0.37 | V | 16 |
| 17 | 150          | 0.84 | V | 16 |
| 18 | 183.31 +/- 1 | 1.06 | V | 16 |
| 19 | 183.31 +/- 3 | 0.70 | V | 16 |
| 20 | 183.31 +/- 7 | 0.60 | V | 16 |

## 2.3. BASES DE DONNEES ADDITIONNELLES

### 2.3.1. LA CLIMATOLOGIE DES NUAGES ISCCP

Afin d'identifier les mesures micro onde nuageuses et avoir une estimation indépendante de la température de surface, la base de données ISCCP (International Satellite Cloud Climatologie Project) a été utilisée. Cette climatologie permet la classification des nuages et fournit divers paramètres nuageux, tels la température, l'opacité optique et la pression du sommet du nuage. La climatologie permet ainsi d'identifier les situations non nuageuses et nous procure dans ce cas, une estimation précise et indépendante de la température de la surface. Toutes ces grandeurs physiques sont obtenues par analyse radiative en utilisant un ensemble de mesures provenant des satellites géostationnaires et polaires opérant dans le visible et l'infrarouge (*Rossow et Schiffer*, 1991). Les paramètres de nuage et les températures de surface sont échantillonnés à 30 km de résolution au sol et toutes les 3 heures. Toutes ces grandeurs sont extraites à partir d'un sous ensemble de la base de données ISCCP, appelé « ISCCP-DX ».

### 2.3.2. LES PROFILS DE TEMPERATURE ET D' HUMIDITE ERA40

Les données atmosphériques et de surface ERA-40 sont incluses, ou utilisées à l'aide du système d'assimilation variationnelle du Centre Européen de Prévision Météorologique à Moyen Terme (CEPMMT ou ECMWF) dans le modèle de prévision numérique global IFS. Les réanalyses ERA-40 réalise ainsi la synthèse de l'ensemble des données *in situ* et de télédétection disponibles depuis 1957. Les grandeurs physiques résultantes sont disponibles sur une grille journalière de 1,125°, soit environ 125 km

à l'équateur de résolution et toutes les six heures. En plus, Les champs atmosphériques de température et d'humidité sont fournis sur soixante niveaux du modèle. Une description plus détaillée des champs ERA-40 est disponible dans (*Simmons and Gibson, 2000*).

### 2.3.3. LA CLASSIFICATION DE VEGETATION

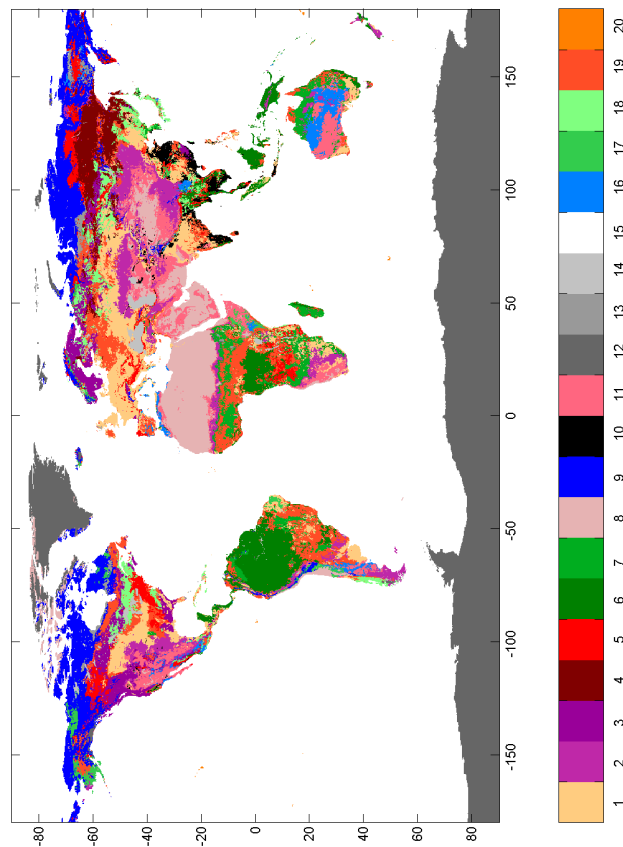


Figure 2-4: Distribution géographique des classes de végétation BATS (pour la désignation des codes des classes, voir le tableau 2-5)

Les types de végétation ont été identifiés en utilisant la climatologie de couvert végétal BATS (Biosphere-Atmosphere Transfer Scheme). Cette climatologie identifie les types de végétation en se basant sur une combinaison complexe de trois climatologies de surface issues de *Matthews (1983)*, *Olsen*

*et al.* (1983) et la climatologie de *Wilson* (1984) décrite dans *Wilson et al.* (1987). Pour simplifier la référence à cette climatologie, seule la référence à *Dickinson et al.* (1986) a été adoptée. BATS définit une vingtaine de classes de végétation sur une grille de 30 km de résolution au sol. La figure 2-4 montre la distribution géographique de l'ensemble des classes de végétation sur le globe. Le tableau 2-5 récapitule les différentes classes de végétation disponibles. Pour plus de détails concernant cette climatologie, le lecteur peut consulter *Dickinson et al.* (1986).

Tableau 2-5: Biosphere-atmosphere Transfer scheme (bats) vegetation classes

| Classes | Légende                    |
|---------|----------------------------|
| 1       | Crops, Mixed Farming       |
| 2       | Short Grass                |
| 3       | Evergreen Needleleaf Trees |
| 4       | Deciduous Needleleaf Tree  |
| 5       | Deciduous Broadleaf Trees  |
| 6       | Evergreen Broadleaf Trees  |
| 7       | Tall Grass                 |
| 8       | Desert                     |
| 9       | Tundra                     |
| 10      | Irrigated Crops            |
| 11      | Semi-desert                |
| 12      | Ice Caps and Glaciers      |
| 13      | Bogs and Marshes           |
| 14      | Inland Water               |
| 15      | ocean                      |
| 16      | Evergreen Shrubs           |
| 17      | Deciduous Shrubs           |
| 18      | Mixed Forest               |
| 19      | Interrupted Forest         |
| 20      | Water and Land Mixtures    |

## CHAPITRE 3

---

### RADIOMETRIE MICRO-ONDE

---

|          |                                     |           |
|----------|-------------------------------------|-----------|
| <b>3</b> | <b>RADIOMETRIE MICRO-ONDE</b>       | <b>22</b> |
| 3.1.     | L'ABSORPTION GAZEUSE                | 22        |
| 3.2.     | LE DOMAINE DES HYPERFREQUENCES      | 24        |
| 3.3.     | LE TRANSFERT RADIATIF               | 27        |
| 3.4.     | LES FONCTIONS DE POIDS              | 29        |
| 3.5.     | LE MODELE DE TRANSFERT RADIATIF ATM | 32        |

---

## 3 RADIOMETRIE MICRO-ONDE

---

Ce chapitre récapitule quelques notions de base liées à la radiométrie dans le domaine des hyperfréquences et qui sont particulièrement utiles pour la compréhension des thèmes traités dans ce travail de thèse. Pour plus de détails concernant la radiométrie passive micro-onde, le lecteur pourrait consulter entre autres ouvrages [Ulaby *et al.* 1982, 1986]. Davantage de rappels concernant cette thématique sont présentés dans l'annexe 1.

### 3.1.L'ABSORPTION GAZEUSE

La propagation des ondes électromagnétiques dans l'atmosphère est principalement influencée par la présence des composants gazeux de l'atmosphère mais aussi par celle des hydrométéores (neige, pluie, gouttelettes et cristaux nuageux) et des aérosols. Les composants gazeux qui constituent l'atmosphère interagissent de manière différente avec le rayonnement électromagnétique selon les gammes de fréquence



et les résultats de ces interactions peuvent être observés. Si on se limite au simple critère de leur proportion volumique dans l'atmosphère, on peut distinguer deux classes de constituants gazeux :

- ❖ Les gaz dont la proportion volumique dans l'atmosphère est fixe ou peu variable : c'est le cas de l'oxygène ( $O_2$ ), de l'azote ( $N_2$ ), de l'argon (Ar), du dioxyde de carbone ( $CO_2$ ). L'oxygène présente des raies d'absorption importantes dans le domaine des hyperfréquences ;
- ❖ Les gaz à proportion volumique variable : c'est principalement le cas de la vapeur d'eau. Elle joue un rôle primordial dans la formation des nuages et le transport d'énergie sous différentes formes : elle permet entre autres la régulation de la température de l'air par absorption de l'énergie solaire. La vapeur d'eau est extrêmement variable en temps et en espace et devient très rare au delà de 15-20 km. En plus, l'eau atmosphérique peut prendre différentes formes qui interagissent de façon différente avec le rayonnement électromagnétique selon les fréquences. L'ozone est également un gaz à proportion volumique variable dans l'atmosphère. Ce gaz présente des raies d'absorption principalement dans le domaine de l'ultraviolet.

Les raies d'absorption observées ont une largeur naturelle liée à la durée de vie de l'état excité de la molécule. En plus de la largeur naturelle de la raie, le profil de la raie est déterminé par la concurrence de l'effet Doppler et des collisions entre molécules. L'effet Doppler se produit quand l'observateur et une source de rayonnement électromagnétique sont en mouvement l'un par rapport à l'autre. Dans ce cas, la longueur d'onde reçue par l'observateur est plus petite quand la source s'approche de lui et plus grande quand elle s'en éloigne. La conséquence directe de l'effet Doppler est l'élargissement des formes de raies. Les raies d'absorption sont formées par l'interaction du rayonnement électromagnétique avec une multitude d'espèces moléculaires. En plus, ces espèces sont animées par des mouvements complexes et désordonnés par rapport à l'observateur : en même temps, des espèces moléculaires peuvent s'approcher de l'observateur créant une raie fine décalée vers les courtes longueurs d'onde et d'autres peuvent s'en éloigner en créant une raie fine mais cette fois-ci décalée vers les grandes longueurs d'onde. En plus de l'effet Doppler, des collisions entre espèces moléculaires peuvent intervenir. Les collisions et l'effet Doppler sont deux phénomènes qui cohabitent et conduisent à l'élargissement des raies d'absorption. En hyperfréquences et dans la troposphère, se sont les collisions entre molécules qui dominent l'élargissement des raies ; par contre l'effet Doppler devient dominant au delà de 60 km. On parle souvent du profil de Voigt plus réaliste car il combine les effets Doppler et les effets de collisions entre espèces moléculaires.

Pour une fréquence donnée et des conditions de température et de pression fixées, les coefficients d'absorption sont obtenus par sommation raie par raie des spectres d'absorption des constituants gazeux. La modélisation de l'absorption gazeuse résonnante tient compte de l'intensité des raies d'absorption et de leur forme. En équilibre thermodynamique, une raie isolée a une intensité qui dépend uniquement de la température et qui peut être exprimée selon la loi de distribution de probabilité de Maxwell-Boltzmann d'occupation des états. La modélisation de l'absorption gazeuse doit également tenir compte du « continuum ».

### 3.2.LE DOMAINE DES HYPERFREQUENCES

L'interaction entre les différents composants de l'atmosphère et le rayonnement électromagnétique constitue la base physique de l'exploitation des mesures satellitaires.

En effet, selon les gammes de fréquences, les résultats de ces interactions peuvent être observés pour ensuite déduire les concentrations des composants gazeux ou bien la distribution de grandeurs physiques qui y sont liés tels la température et/ou l'humidité atmosphériques.

Dans le domaine des hyperfréquences, les molécules qui ont un impact significatif en terme d'absorption du rayonnement électromagnétique sont l'oxygène et la vapeur d'eau. Le champ magnétique incident interagit avec le moment dipolaire magnétique de la molécule de  $O_2$  et provoque une famille de raies autour de 50-70 GHz et une raie isolée autour de 118 GHz. Deux autres raies d'absorption sont présentes autour de 22 et 183 GHz, mais cette fois-ci de la molécule de  $H_2O$  principalement dues aux transitions de rotation de la molécule sous l'effet du champ électrique.

La figure 3-1 (a) montre le spectre d'absorption pour des fréquences allant de 0.3 à 300 GHz avec l'opacité due à l'oxygène et à la vapeur d'eau et (b) la transmission atmosphérique totale (incluant la vapeur d'eau, l'oxygène et les composant mineurs) pour la même gamme de fréquences. Les calculs ont été effectués par le modèle ATM (*Pardo et al.* 2001) à la verticale et pour une atmosphère tropicale (contenu intégré de vapeur d'eau  $\sim 40 \text{ kg/m}^2$ ). Le modèle ATM sera décrit à la fin de ce chapitre. La figure 3-1(a) montre bien les pics d'absorption d'oxygène autour de 50-70 et de 118 GHz et des pics d'absorption de la vapeur d'eau dans le voisinage de 22 et 183 GHz.

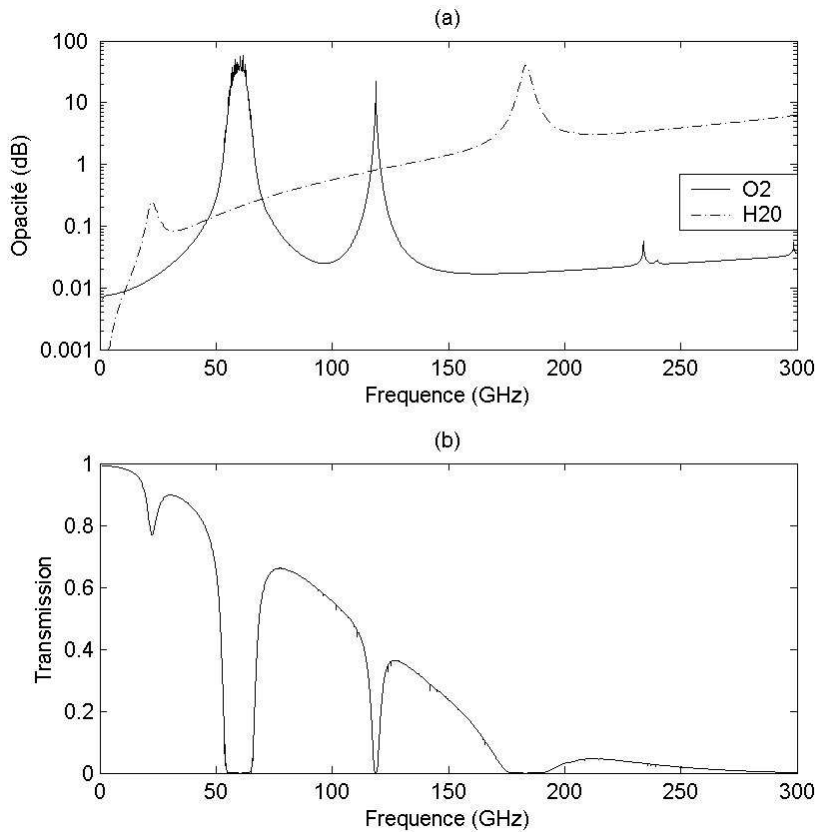


Figure 3-1: (a) Opacité atmosphérique au nadir due à l'oxygène et à la vapeur d'eau dans le domaine 0.3-300 GHz pour une atmosphère tropicale (contenu intégré en vapeur d'eau 40 kg/m<sup>3</sup>). (b) Transmission atmosphérique totale (incluant les composants mineures) en ciel clair pour une atmosphère tropicale.

Notons que, en dehors des raies de résonances de H<sub>2</sub>O et de O<sub>2</sub>, un autre type d'atténuation du signal existe et est communément appelé « continuum ». C'est un excès d'absorption non prédit par les modèles théoriques qui a été constaté *in situ* et en laboratoire. La contribution du continuum augmente légèrement avec la fréquence et devient plus importante en présence de vapeur d'eau.

#### ❖ Raies d'absorption de l'oxygène autour de 50-70 GHz et à 118 GHz

L'oxygène fait partie des gaz atmosphériques dont la concentration est stable et assez bien connue jusqu'à environ 80 km. La mesure satellitaire à une fréquence appartenant au spectre d'absorption de l'oxygène permettrait la restitution de la température atmosphérique car seul l'effet de l'oxygène est dominant. En connaissant à la fois la température de surface, l'émissivité de surface ainsi que la température de brillance, le profil de température atmosphérique le long du chemin parcouru par le rayonnement électromagnétique peut être déduit. L'instrument AMSU-A possède plusieurs canaux autour du complexe de raies d'absorption d'oxygène à 50-70 GHz. Les données issues de cet instrument sont susceptibles de fournir des profils de température atmosphérique jusqu'à environ 45 km d'altitude (voir figure 3-3).

En plus du complexe de raies d'absorption d'oxygène à 50-70 GHz, une raie isolée existe à 118 GHz. Sonder l'atmosphère à l'aide de fréquences voisines de cette raie présente l'avantage d'une résolution au sol deux fois meilleure que celle obtenue en sondant autour des raies à 50-70 GHz avec la même taille d'antenne. En plus d'être isolée, la raie d'absorption à 118 GHz est presque symétrique contre un complexe de raies rapprochées autour de 50-70 GHz, ce qui simplifierait l'exploitation technique des mesures effectuées à cette fréquence. Par contre, il existe des limitations significatives pour l'exploitation de la raie à 118 GHz par rapport aux autres raies d'absorption de l'oxygène. Il s'agit principalement de l'augmentation de l'absorption par le continuum de vapeur d'eau et par l'eau liquide nuageuse ainsi que l'augmentation de la diffusion par les particules de glace nuageuses au fur et à mesure que la fréquence augmente.

En se basant sur les fréquences de résonance de l'oxygène, il est difficile de sonder la température atmosphérique au-delà de 60 km d'altitude car le coefficient d'absorption de l'oxygène se retrouve perturbé par le champ magnétique terrestre. Cette perturbation se traduit par l'effet Zeeman sur l'oxygène produisant ainsi une division du complexe de raies d'oxygène en sous raies. Cependant, les travaux de *Pardo et al.* (1995, 1998, 2002) ont démontré la possibilité de sonder l'atmosphère au delà de cette altitude avec une modélisation adéquate de l'effet Zeeman.

#### ❖ Raie d'absorption de la vapeur d'eau à 183.31 GHz

Dans le domaine des hyperfréquences, l'humidité atmosphérique peut être restituée grâce aux fréquences de résonance de vapeur d'eau. On a vu que la molécule d'eau possède deux raies d'absorption en dessous de 200 GHz : une très forte au voisinage de 183.31 GHz et une autre moins forte à 22 GHz. La

raie à 22 GHz sert habituellement à restituer le contenu intégré en vapeur d'eau tandis que celle à 183.31 GHz est exploitée pour le sondage de l'humidité atmosphérique. L'instrument AMSU-B par exemple comporte 3 canaux autour de la raie à 183.31 GHz ainsi qu'un canal à 150 GHz permettant ainsi la restitution du profil d'humidité jusqu'à 15 km. Le canal à 150 GHz, de part son éloignement de la raie d'absorption est à la fois sensible à la vapeur d'eau atmosphérique et à la surface terrestre. Notons également qu'en conditions de ciel clair et très sec, le canal AMSU-B à 183.31 +/- 7 « voit » la surface.

#### ❖ Les canaux fenêtres

A partir des observations micro-onde et en plus de la température et l'humidité atmosphériques, d'autres grandeurs physiques peuvent être déterminées. L'atmosphère est presque transparente pour les canaux fenêtres éloignés des raies d'absorption. A ces fréquences, le signal reçu par le satellite provient principalement de la surface de la Terre et des couches inférieures de l'atmosphère. Les fonctions de poids correspondantes ont le maximum de sensibilité au voisinage de la surface. Chaque fréquence est sensible à une ou plusieurs grandeurs physiques. Ainsi, les mesures autour de 22 GHz sont souvent utilisées pour la restitution du contenu intégré de vapeur d'eau tandis que les mesures à 30-40 GHz sont utilisées pour mesurer l'eau liquide nuageuse. Le contenu en eau des nuages, la concentration de glace dans les nuages, le taux de pluie, ont également été estimés à partir des canaux fenêtres. Le lecteur peut consulter les travaux récents de (*Grody et al.* 2001), (*Weng et al.* 2003), et (*Zhao et Weng*, 2002) mais tous les principes sont déjà dans des articles anciens comme (*Wilheit et al.* 1978) entre autres auteurs.

### 3.3.LE TRANSFERT RADIATIF

Dans la gamme des hyperfréquences, un capteur passif à bord d'un satellite mesure le rayonnement électromagnétique émis par différentes couches atmosphériques, la Terre et le fond cosmique (figure 3-2). Dans cette configuration, le capteur reçoit à la fois (1) le rayonnement naturel de la surface de la Terre en partie atténué par l'atmosphère, (2) le rayonnement émis par l'ensemble des couches atmosphériques et enfin (3) le rayonnement descendant réfléchi par la surface et atténué par l'atmosphère. (4) Ce dernier résulte de la contribution du fond cosmique et de l'émission des couches atmosphériques successives atténuée par les couches atmosphériques rencontrées lors de la propagation du rayonnement.

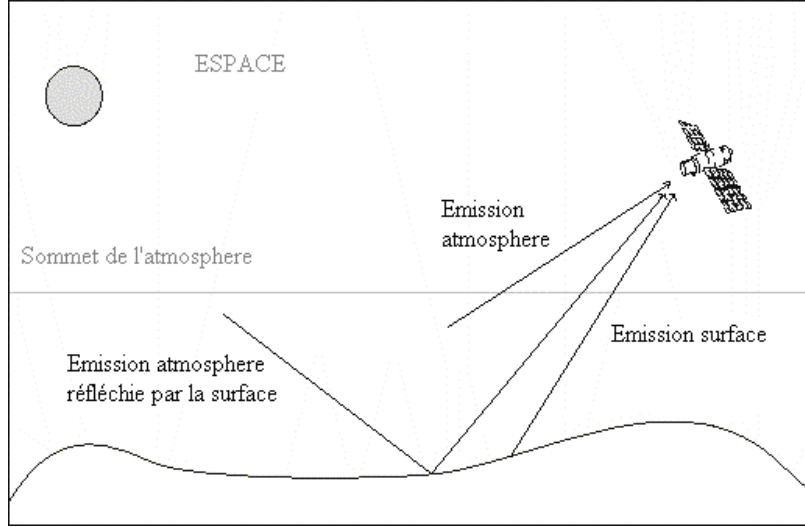


Figure 3-2: Sources de rayonnement intervenant dans le transfert radiatif

En milieu non diffusant, en équilibre thermodynamique locale, et avec une atmosphère stratifiée en différentes couches atmosphériques parallèles, l'expression de la température de brillance qui est mesurée par le satellite observant la Terre à l'angle  $\theta$ , et à la fréquence  $\nu$ , s'écrit alors :

$$T_B(\nu, \theta) = \varepsilon_0 T_0 \Gamma + (1 - \varepsilon_0) \Gamma T_{\downarrow} + T_{\uparrow} \quad (1)$$

$$T_{\downarrow}(\nu, \theta) = \int_0^{\infty} \alpha(\nu, z) e^{-\int_0^z \alpha(\nu, z') dz'} T(z) dz \quad (2)$$

$$T_{\uparrow}(\nu, \theta) = \int_0^{\infty} \alpha(\nu, z) e^{-\int_z^{\infty} \alpha(\nu, z') dz'} T(z) dz \quad (3)$$

$$\Gamma = e^{\frac{-\tau(0, \infty)}{\cos(\theta)}} \quad (4)$$

$T_B(\nu, \theta)$  : La température de brillance mesurée par la satellite à la fréquence  $\nu$  et à l'angle  $\theta$ .

$\varepsilon_0$  : L'émissivité de la surface de la Terre pour la fréquence  $\nu$  et l'angle  $\theta$ .

$T_0$  : Température physique de la surface de la Terre.

$T(z)$  : Température physique de l'atmosphère à l'altitude  $z$ .

$\Gamma$  : Transmission atmosphérique.

$T_{\downarrow}$  : Rayonnement atmosphérique descendant incluant le rayonnement cosmique à 2.7 K descendant atténué par l'atmosphère.  $T_{\downarrow}$  est par la suite réfléchi par la surface et atténué par l'atmosphère jusqu'au capteur satellite.

$T_{\uparrow}$  : Rayonnement montant émis par l'atmosphère selon la direction d'observation.

$\alpha(\vartheta, z)$  : Coefficient d'absorption du milieu (Np/m).

L'équation (1) est obtenue à partir de l'équation de transfert radiatif en milieu non diffusant que nous allons détailler dans l'annexe 1. Cette équation fait intervenir la notion d'émissivité de surface qui est définie par le rapport entre le rayonnement émis par la surface et celui émis par un corps noir à la même température physique.

### 3.4.LES FONCTIONS DE POIDS

Le principe de base du sondage atmosphérique de température et d'humidité dans le domaine des hyperfréquences réside dans le choix minutieux des fréquences d'observation en fonction de leurs proximités des raies d'absorption d'oxygène et de vapeur d'eau. Plus la fréquence d'observation est proche de la fréquence de résonance de l'oxygène ou de la vapeur d'eau, plus la transmission atmosphérique est faible (presque nulle). Dans ce cas là, l'équation de transfert radiatif se retrouve simplifiée (se rapporter à l'annexe 1 pour plus de détails sur l'équation de transfert radiatif) :

$$T_B(\vartheta, \theta) = \int_0^{\infty} \alpha(\vartheta, z) e^{-\int_z^{\infty} \alpha(\vartheta, z') dz'} T(z) dz \quad (5)$$

$T_B(\vartheta, \theta)$  : La température de brillance mesurée par la satellite à la fréquence  $\nu$  et à l'angle d'observation  $\theta$ .

$T(z)$  : Température physique de l'atmosphère à l'altitude  $z$ .

$\alpha(\vartheta, z)$  : Coefficient d'absorption du milieu sur le parcours  $dz$  (Np/m).

Cette dernière équation nous permet d'introduire le concept de fonction de poids en température comme suit :

$$W_{(\vartheta, \theta)}(z) = e^{\frac{-\tau(z, \infty)}{\cos(\theta)}} \alpha(z) \quad (6)$$

Ou bien:

$$W_{(\vartheta, \theta)}(z) = \frac{\partial \Gamma_{(\vartheta, \theta)}(z, \infty)}{\partial z} \quad (7)$$

$$\Gamma = e^{\frac{-\tau(0, \infty)}{\cos(\theta)}} \text{ Transmission atmosphérique.}$$

Les fonctions de poids dépendent à la fois de la température et du rapport de mélange d'un gaz absorbant. En plus, elles sont fonction de l'altitude. Les fonctions de poids sont principalement utilisées pour caractériser la quantité d'un gaz dans l'atmosphère, c.-à-d., comment ses propriétés de transmission changent avec l'altitude. La fonction de poids étant la dérivée du profil de transmission atmosphérique, elle présente des pics de sensibilité de la mesure à une grandeur physique bien déterminée à une altitude donnée correspondant au maximum d'absorption. Ainsi, la fonction de poids croît jusqu'à une altitude  $Z_{\max}$ , qui caractérise l'altitude du maximum de sensibilité, et puis décroît jusqu'au sommet de l'atmosphère. La connaissance des altitudes du maximum de sensibilité permet d'identifier les couches atmosphériques qui ont le plus contribué au signal reçu par le satellite.

La figure 3-3 montre les fonctions poids des instruments AMSU (Advanced Microwave Sounding Unit) A et B à bord des satellites polaires de la NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) pour une configuration de mesures au nadir. Les calculs ont été effectués à l'aide du modèle ATM et pour une atmosphère tropicale. Pour une atmosphère et une fréquence données, l'altitude du pic de sensibilité à un paramètre augmente avec l'angle d'observation. En effet, quand l'instrument balaye du nadir aux angles forts, le chemin optique parcouru par le signal entre le satellite et la Terre devient plus important.

Par conséquent, le choix des fréquences de sondage d'une grandeur physique (la température ou l'humidité atmosphérique) se fait sur la base des maximums des fonctions de poids et de leur largeur. En effet, effectuer des mesures à une fréquence dont la fonction poids admet un maximum à l'altitude  $Z$  revient à restituer de façon préférentielle les paramètres atmosphériques à cette altitude.

Aux fréquences de résonance des molécules ( $O_2$  et  $H_2O$ ), un instrument satellitaire observant la Terre, serait plus sensible aux couches supérieures de l'atmosphère. Par contre, dès que l'instrument observe la Terre à des fréquences plus éloignées des raies d'absorption, il devient plus sensible aux basses couches atmosphériques et à la surface. Le spectre de transmission atmosphérique (figure 3-2-b) montre que l'atmosphère est quasi transparente pour des régions spectrales entre les différentes raies d'absorption. Par conséquent, la combinaison de canaux à des fréquences plus au moins voisines des raies d'absorption



permettrait à l'instrument satellitaire de sonder la vapeur d'eau et la température sur différentes couches atmosphériques jusqu'à la surface.

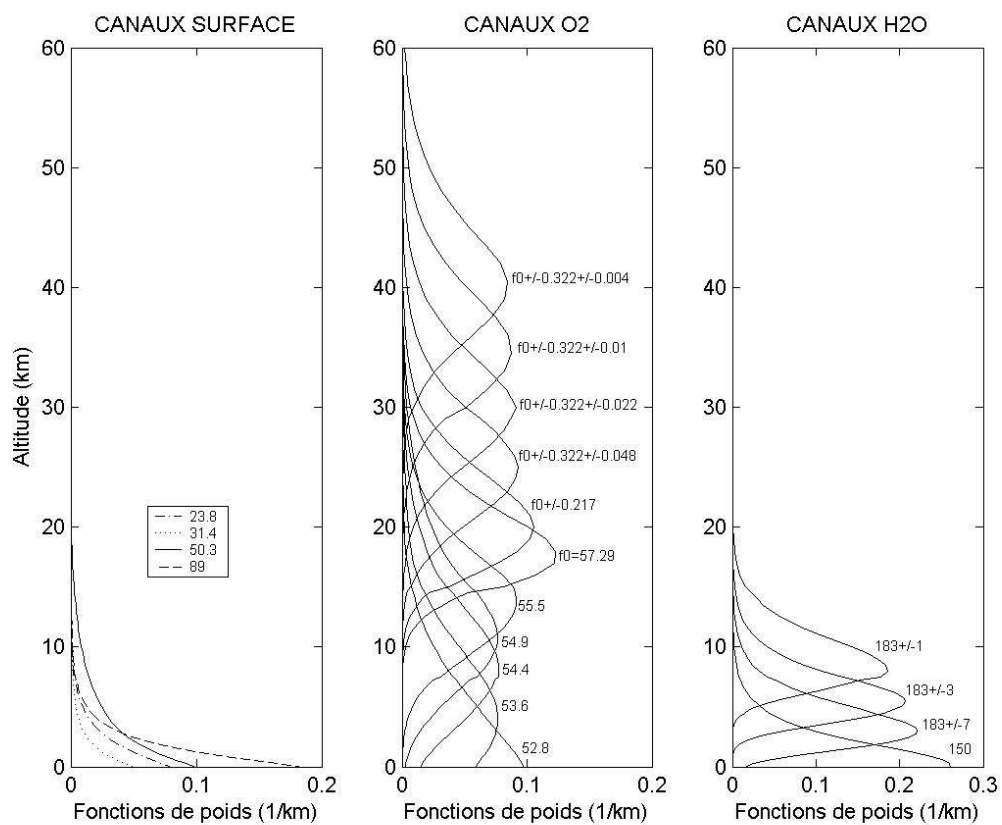


Figure 3-3 : Fonctions de poids aux fréquences de l'instrument AMSU (allant de 23 à 190 GHz) pour une atmosphère tropicale et pour une configuration de mesures au nadir.

### 3.5.LE MODELE DE TRANSFERT RADIATIF ATM

Le modèle de transfert radiatif utilisé dans ce travail de thèse est ATM (Atmospheric Transmission at Microwaves) (*Pardo et al.* 2001). Ce modèle, basé sur de récents développements théoriques et expérimentaux, est complètement approprié pour des fréquences allant de 0.3 à 2000 GHz. Le modèle permet de simuler le transfert radiatif selon l'hypothèse d'une atmosphère plan parallèle, pour des applications au sol ou satellitaires. Il simule également le transfert radiatif en géométrie sphérique pour les besoins du sondage au limbe. L'absorption par la vapeur d'eau et l'oxygène y est modélisée ainsi que celle des gaz minoritaires comme O<sub>3</sub>, N<sub>2</sub>O et CO parmi d'autres.

Le modèle de transfert radiatif effectue des calculs de l'opacité atmosphérique à différentes fréquences et pour différentes couches atmosphériques ; il simule ainsi les radiances qui pourraient être mesurées par un instrument (satellite ou au sol) en tenant compte de l'état de l'atmosphère (profils de température et d'humidité, concentration d'autres gaz) et de l'état de surface (surface marine et émissivité fixe à différentes polarisations). Ce modèle a été évalué par comparaison à d'autres modèles de transfert radiatifs (*Garand et al.* 2001). Les simulations de transfert radiatif qui ont été utilisées dans ce travail de thèse, ont été réalisées avec l'hypothèse d'une atmosphère non diffusante. Cependant, le modèle ATM tient également compte de phénomènes de diffusion par les hydrométéores et a récemment été utilisé à cet effet (*Wiedner et al.* 2004). Pour plus de détails concernant le modèle de transfert radiatif ATM, le lecteur peut consulter *Pardo et al.* (2001).

## CHAPITRE 4

---

### L' EMISSIVITE DE SURFACE A PARTIR DES MESURES AMSU

---

Ce chapitre est basé sur : Karbou, F., C. Prigent, L. Eymard, and J. Pardo (2004): Microwave land emissivity calculations using AMSU measurements. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, (A paraître)

|          |   |           |
|----------|---|-----------|
| <b>4</b> | <b>L' EMISSIVITE DE SURFACE A PARTIR DES MESURES AMSU</b> | <b>34</b> |
| 4.1.     | INTRODUCTION  | 34        |
| 4.2.     | SURFACE SPECULAIRE OU LAMBERTIENNE ?                      | 36        |
| 4.3.     | EXEMPLE DE CARTES MENSUELLES D' EMISSIVITE DE SURFACE     | 43        |
| 4.4.     | PUBLICATION ASSOCIEE AU CHAPITRE                          | 47        |

---

## 4 L' EMISSIVITE DE SURFACE A PARTIR DES MESURES AMSU

---

### 4.1. INTRODUCTION

Les mesures passives issues des instruments AMSU A et B à bord des satellites orbitaux polaires de la NOAA sont de plus en plus utilisés dans les modèles numériques opérationnels de prévision du temps (NWP) (*TOVS conference study*, 2003). En effet, l'instrument AMSU-A possède des canaux utiles pour le sondage de la température atmosphérique tandis que les canaux d'AMSU-B sont conçus pour la restitution des profils d'humidité atmosphérique. En outre, les canaux fenêtre d' AMSU sont sensibles à la surface, au nuage, et à la pluie, et peuvent être employés pour restituer des grandeurs physiques tels que l'eau précipitable, la concentration de glace, le taux de précipitation, ou l'eau liquide de nuage (se référer par exemple aux travaux de *Grody et al.* (2000), *Weng et al.* (2003), et *Zhao and Weng* (2002)).

Cependant, les mesures AMSU sont davantage utilisées au dessus des surfaces océaniques et sont insuffisamment exploitées sur terre. L'émissivité de surface de la terre est élevée, et est souvent de proche de 1,0, par rapport à celle des océans. En plus, elle varie à la fois en temps et en espace et elle dépend de divers paramètres tels la rugosité et l'humidité du sol. Par conséquent, il est plus difficile de distinguer entre la contribution de la surface et celle de l'atmosphère au-dessus des surfaces continentales qu'au-dessus des surfaces océaniques.

Jusqu'à présent, uniquement les canaux de sondage qui ne sont pas sensibles à la surface sont utilisés de façon opérationnelle au-dessus des surfaces continentales. Le travail entrepris sur l'estimation de l'émissivité de surface est essentiellement motivé par la nécessité d'améliorer les restitutions atmosphériques de température et d'humidité sur Terre surtout dans les basses couches de l'atmosphère. Il est donc crucial d'estimer l'émissivité de surface pour permettre la restitution des profils atmosphériques de température et d'humidité au-dessus des continents.

Certains auteurs comme *Isaacs et al.* (1989) et *Weng et al.* (2001) ont adopté une approche de modélisation de l'émissivité de surface. Cependant, l'utilisation de ces approches pour des applications globales est limitée par le manque de paramètres d'entrée pour alimenter les différents modèles ; il s'agit principalement des caractéristiques de surface difficilement disponibles à l'échelle globale telles les caractéristiques de la végétation, l'humidité de sol, la rugosité etc.

Des estimations d'émissivités de surface à partir de mesures *in situ* et aéroportées ont été effectuées. En effet, des estimations de l'émissivité de surface à partir de mesures micro onde aéroportées ont été réalisées pour estimer l'émissivité de la forêt et des zones agricoles (*Hewison, 2001*), ainsi que celle de la neige et des zones de glace (*Hewison and English, 1999*) à 24, 50, 89, et 150 GHz. Par ailleurs, l'émissivité de surface a été également estimée à partir de mesures micro onde au sol sur une variété de types de végétation allant des zones arides aux zones à forte densité de végétation (c'est le cas par exemple des travaux de *Calvet et al.* (1995), *Matzler* (1994, 1990), et *Wigneron et al.* (1997)). Cependant, l'extrapolation de ces mesures d'émissivité à des échelles de surface plus grandes, compatibles avec celle des satellites, est une tâche assez délicate.

Des études d'émissivité de surface à partir de mesures satellitaires ont été également réalisées à des échelles régionales (voir par exemple les travaux de *Felde and Pickle* (1995), *Choudhury* (1993), *Jones and Vonder Haar* (1997), *Morland et al.* (2001, 2000)), et globales (voir les travaux de *Prigent et al.* (1998, 1997, 2000)).

Le but de cette étude est de produire des cartes d'émissivité de surface compatibles avec les fréquences, le mode d'observation et la polarisation des instruments AMSU-A et AMSU-B directement en utilisant les observations issues de ces deux instruments. Il s'agit donc d'obtenir les émissivités de surface

aux fréquences de 23.8, 31.4, 50.3, 89, et 150 GHz, pour tous les angles d'observations AMSU (30 valeurs d'angle d'observations de  $-58^\circ$  à  $58^\circ$  par rapport au nadir) en enlevant la contribution de l'atmosphère, des nuages et de la pluie. Le calcul de l'émissivité de surface a été effectué en supposant que la surface est plane et spéculaire. Les données satellitaires auxiliaires ISCCP (le lecteur peut se référer au chapitre2 pour plus de détails sur cette climatologie) sont utilisées pour identifier des observations non nuageuses AMSU et pour fournir une estimation précise et indépendante de la température de surface (*Rossow and Shiffer*, 1991). Les profils de température et d'humidité ERA-40 de l'ECMWF sont utilisés comme entrées au modèle de transfert radiatif ATM nous ont permis de calculer la contribution de l'atmosphère aux mesures satellitaires.

L'étude détaillée de l'émissivité de surface à partir des observations AMSU-A et -B est présentée dans la publication jointe à ce chapitre.

## 4.2.SURFACE SPECULAIRE OU LAMBERTIENNE ?

### 4.2.1. GENERALITES

Au-dessus d'une surface continentale non homogène, un instrument satellitaire peut « voir » simultanément des fractions de différentes classes de végétation, selon son mode et champ de visée. Le signal radiométrique mesuré par un tel instrument est fonction à la fois des émissivités de surface, des températures de surface, et des proportions relatives des différents types de surface qu'il observe. Un instrument du type AMSU-A, par exemple a une tache au sol d'environ 48 km au nadir et qui se dégrade aux angles forts. Avec une telle résolution spatiale, il est certainement plus fréquent d'observer une surface non homogène (sol nu et végétation plus au moins dense) qu'une surface parfaitement homogène. Pour toutes ces raisons, l'émissivité de surface restituée à partir des mesures AMSU-A et AMSU-B (dont la résolution a été dégradée pour convenir à celle d'AMSU-A) est en fait « effective » et ne représente pas tout à fait la réalité du terrain observé. Elle est, par contre, tout à fait adaptée pour des applications atmosphériques ou de surface à partir des mesures AMSU ou d'autres instruments du même type (en supposant un bon étalonnage des différents instruments) car elle traduit exactement ce que « reçoit » l'instrument satellitaire de la surface.

Pour des besoins de simplification, l'émissivité de surface a été calculée en supposant la surface observée par le satellite parfaitement spéculaire.

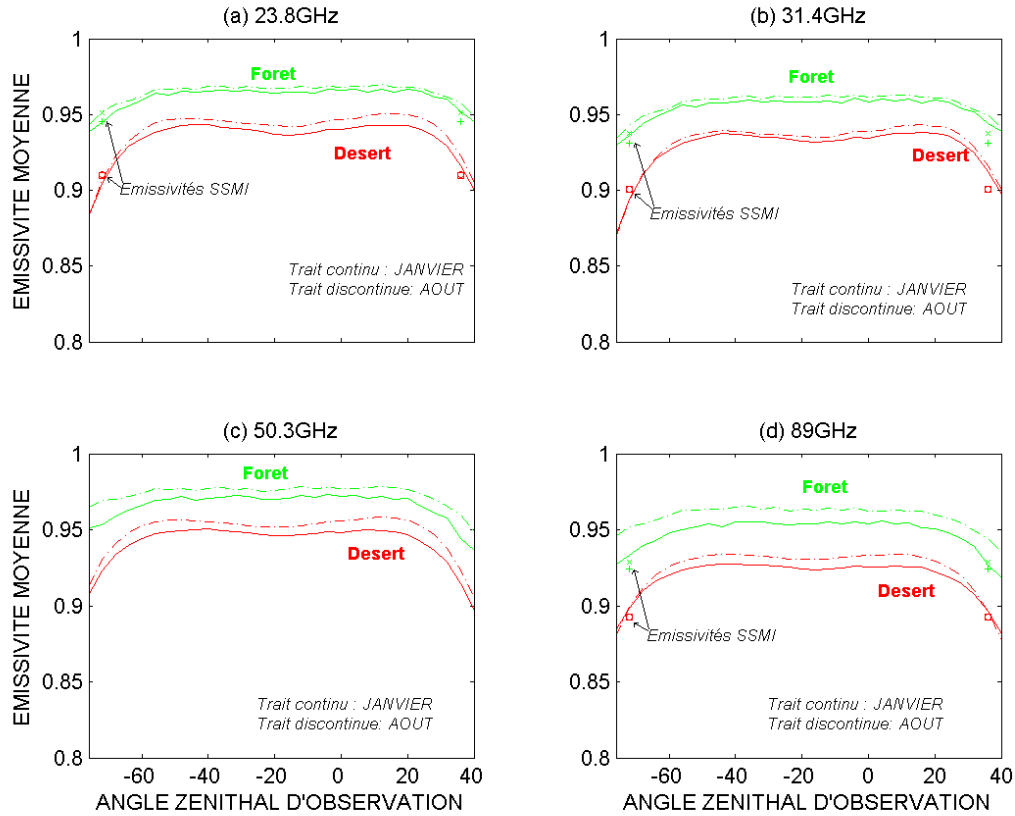


Figure 4-1: Emissivité de surface moyennes pour deux mois de données: Janvier et Août 2000 en fonction de l'angle d'observation zénithal. Les résultats sont séparés par types de surface (désert et forêt dense). Quand cela est possible, les émissivités SSMI (Prigent *et al.* [1998]) aux fréquences les plus proches et pour les mêmes mois sont ajoutées aux graphes.

La validité de l'approximation spéculaire a été évaluée en comparant la différence entre l'émissivité obtenue en utilisant une approche spéculaire et celle calculée en supposant une surface quasi lambertienne. Dans le dernier cas, le rayonnement descendant est supposé venir d'un cône axé sur l'angle spéculaire d'observation avec une gaussienne de  $10^\circ$ . Les simulations ont été effectuées pour des émissivités de 0,7 jusqu'à 1, et pour des angles d'observation allant jusqu'à  $50^\circ$ . Pour une atmosphère standard, la différence d'émissivité entre un cas spéculaire et une situation quasi-lambertienne est très petite. Dans le cas d'une atmosphère tropicale et des angles d'observations élevés, les erreurs liées à l'approximation spéculaire sont inférieures à 1%.

Notons par ailleurs, que pour un calcul globale de l'émissivité de surface, l'approximation inverse (surface lambertienne) n'est pas valable non plus. L'idéal serait bien évidemment d'adapter le calcul de

l'émissivité pour tenir compte à chaque fois du type de surface observée et ceci dans l'hypothèse, certainement fautive, d'une surface parfaitement homogène. Cependant, une telle adaptation du calcul est très compliquée car on ne dispose pas d'information a priori.

L'analyse de l'émissivité calculée avec l'approximation spéculaire (voir la publication associée à ce chapitre) a montré que cette approximation produit des émissivités dont le comportement est conforme au type de surface considéré. Ainsi, sur une surface à forte densité de végétation par exemple: l'émissivité varie très peu avec l'angle d'observation satellite contrairement à une surface désertique. Ceci est cohérent avec le fait qu'une forêt par exemple, a un comportement de quasi-corps noir alors qu'une surface désertique est considérée comme surface spéculaire.

L'approximation spéculaire est peut être inadéquate pour des applications à de grandes échelles ; cependant à des échelles satellitaires elle introduit moins d'erreurs sur l'émissivité que les paramètres d'entrée directement utilisés pour le calcul de l'émissivité. En effet, selon les gammes de fréquence, l'effet de la température de surface ou de l'humidité de l'air par exemple peut être dominant. Pour plus de détails sur l'analyse d'erreurs de l'émissivité de surface, le lecteur peut consulter la section II.C du papier associé à ce chapitre.

#### 4.2.2. SIMULATIONS

Le but de cette section est de montrer par simulations que l'utilisation de l'approximation spéculaire est adaptée pour le calcul de l'émissivité de surface à partir des observations satellitaires.

*Mätzler* (2004) avance que l'on devrait plutôt utiliser l'approximation de surface lambertienne pour le traitement des données satellitaires provenant des instruments AMSU. Ces instruments ayant un mode de balayage transversal, produisent des observations avec un angle d'observation zénithal variant de  $0^\circ$  à  $58^\circ$  par rapport au nadir. L'auteur part du fait que pour des conditions atmosphériques identiques, le rayonnement au-dessus d'une surface lambertienne est plus grand qu'au-dessus d'une surface spéculaire pour les angles faibles, ce qui produirait une surestimation des émissivités calculées avec une approximation spéculaire.

Dans cette section, diverses simulations sont effectuées en utilisant les deux approximations de surface (spéculaire et lambertienne), qui nous ont permis de relativiser l'impact de l'approximation spéculaire sur le calcul des émissivités.



L'approche de *Mätzler* (2004) pour calculer une température de brillance au dessus d'une surface lambertienne a été utilisée. Elle consiste à déterminer un angle effectif, variant selon les atmosphères, et pour lequel le rayonnement atmosphérique descendant provenant de plusieurs directions équivaut à celui provenant selon l'angle effectif. La figure 4-2 reproduit une partie des résultats obtenus par *Mätzler* (2004) au nadir, avec une atmosphère caractérisée par des températures effectives  $T_1$  et  $T_2$  tel que :

$$T_{\text{down}} = T_1 * (1 - t_1) : \text{rayonnement descendant}$$

$$T_{\text{up}} = T_2 * (1 - t_2) : \text{rayonnement montant}$$

$t_1$  et  $t_2$  étant les transmissions atmosphériques. L'auteur a choisi une atmosphère avec  $T_1=285$  et  $T_2=270$  et une émissivité de 0.8. Notons à ce stade que le choix de  $e=0.8$  maximise l'impact du rayonnement descendant et qu'en moyenne l'émissivité aux canaux fenêtres AMSU est de l'ordre de 0.94. D'ailleurs, les résultats montrent que la différence entre les  $T_{bs}$  calculées en mode spéculaire et lambertien est directement liée au choix de l'atmosphère et de l'émissivité de surface.

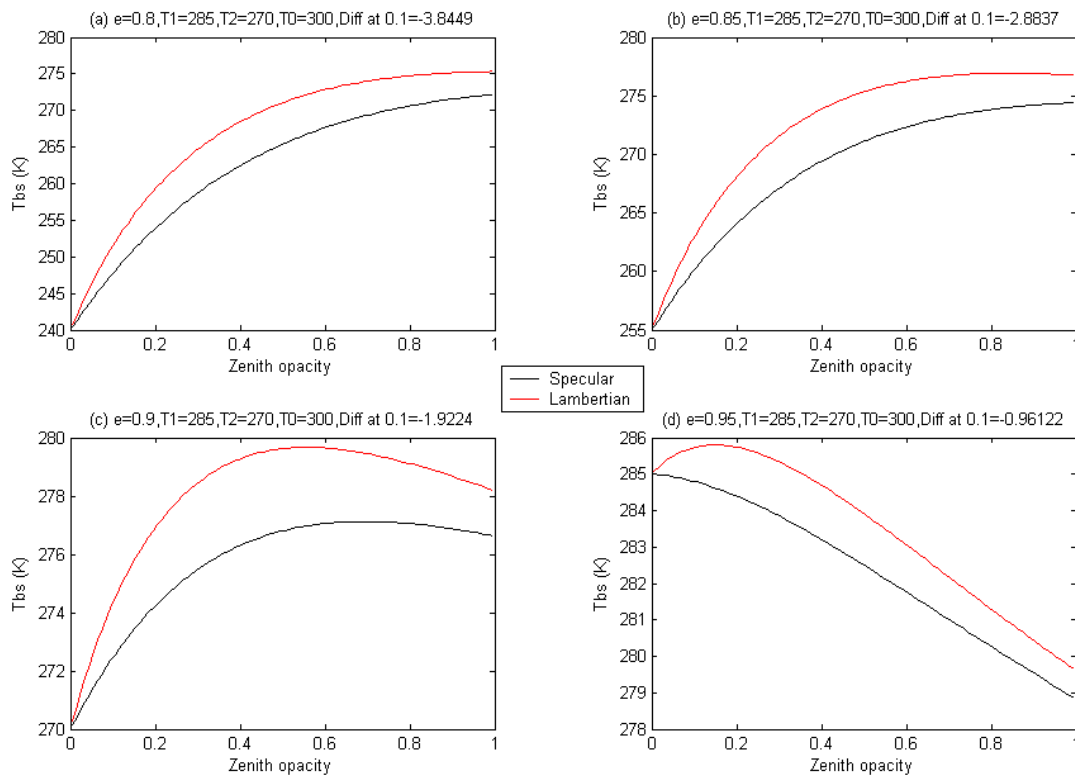


Figure 4-2:  $T_{bs}$  au nadir en fonction de l'opacité de l'atmosphère pour une surface lambertienne (rouge) et spéculaire (noir) avec une température de surface  $T_0=300$  K et une atmosphère à  $T_1=285$  K et  $T_2=270$  K et pour une émissivité de : (a)  $e=0.8$ , (b)  $e=0.85$ , (c)  $e=0.9$  et (d)  $e=0.95$

En effet, la figure 4-2 résume les résultats de comparaison entre une température de brillance calculée au-dessus d'une surface lambertienne et spéculaire en fonction de l'opacité de l'atmosphère. Si la différence entre les deux Tbs apparaît importante pour  $e=0.8$  (figure 4-2.a), elle diminue considérablement quand on fait varier la valeur de l'émissivité pour passer à des valeurs de 0.85, 0.9 et 0.95. La figure 4-3 montre l'impact de l'approximation lambertienne sur le calcul de l'émissivité pour les différents cas traités en supposant cette fois la réflexion parfaitement spéculaire. La différence entre l'émissivité spéculaire et lambertienne devient inférieure à 1% quand l'émissivité initiale est plus grande que 0.9.

Pour la suite, on s'est intéressé à refaire les mêmes expériences avec cette fois si, une atmosphère standard tropicale (figure 4-4) et une atmosphère standard moyenne (figure 4-5). Pour ces atmosphères, les Tbs ont été estimées pour une opacité variable de 0 à 1, pour une surface lambertienne et spéculaire et en utilisant une émissivité variant de 0.8 à 0.95. Dans le cas de l'atmosphère standard, les émissivités ont été par la suite recalculées, en mode spéculaire, pour estimer l'impact des Tbs lambertiennes sur le calcul.

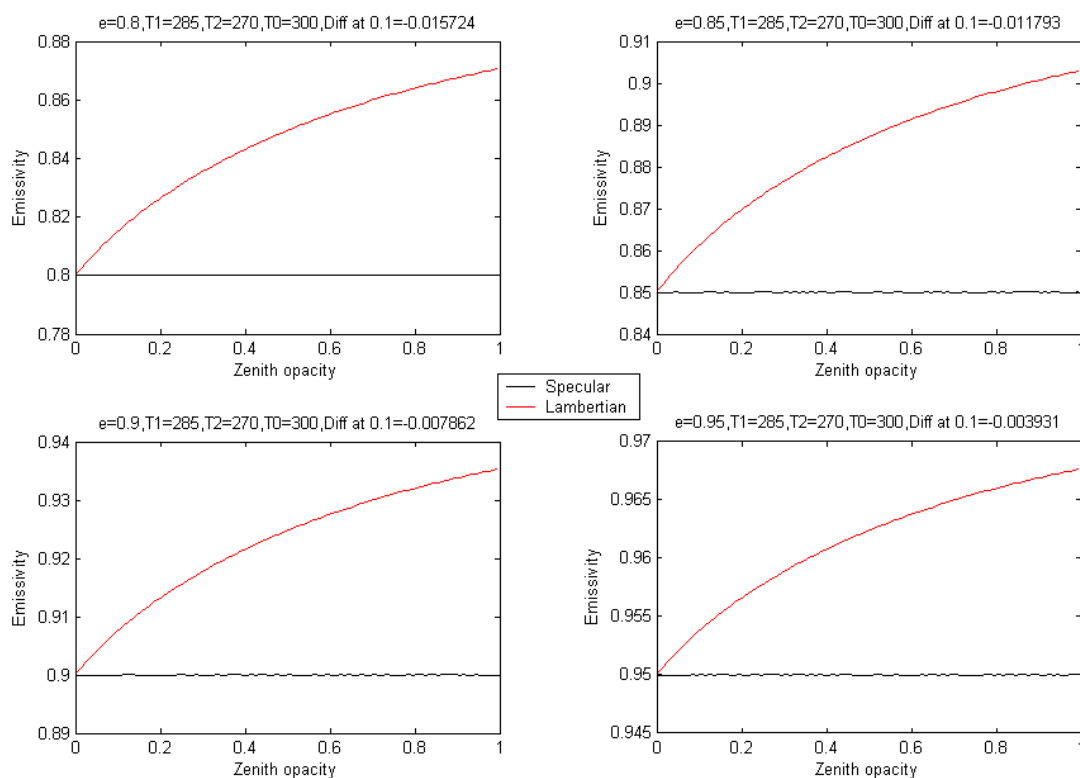


Figure 4-3: Emissivités au nadir en fonction de l'opacité de l'atmosphère pour une surface lambertienne (rouge) et spéculaire (noir) avec une température de surface  $T_0=300$  K et une atmosphère à  $T_1=285$  K et  $T_2=270$  K et pour une émissivité de : (a)  $e=0.8$ , (b)  $e=0.85$ , (c)  $e=0.9$  et (d)  $e=0.95$ . Les Tbs utilisées sont celles obtenues dans la figure 1.

Les courbes de la figure 4-4 montrent que la différence entre les Tbs au-dessus de surfaces spéculaire et lambertienne est inférieure à 2 K pour une atmosphère tropicale (assez opaque) et pour des émissivités initiales supérieures à 0.9. Pour une atmosphère standard (figure 4-5), l'erreur commise sur l'émissivité spéculaire est inférieure à 1% pour des émissivités initiales supérieures à 0.9.

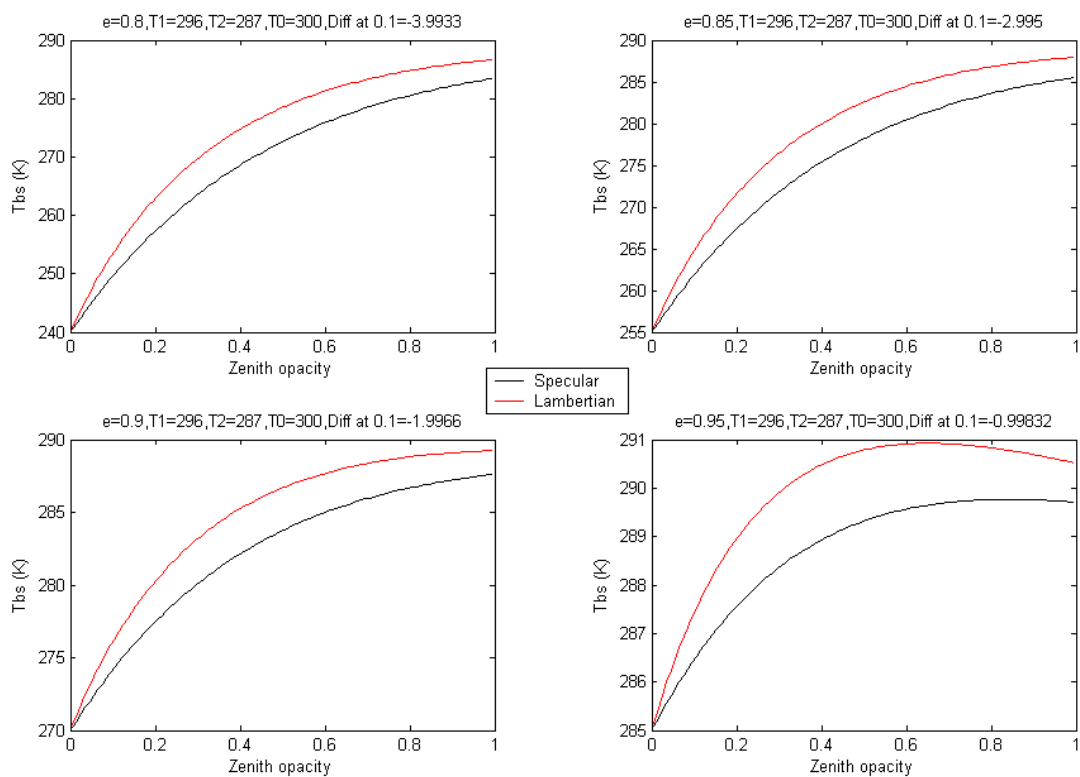


Figure 4-4: Tbs au nadir en fonction de l'opacité de l'atmosphère pour une surface lambertienne (rouge) et spéculaire (noir), pour une atmosphère tropicale et avec une émissivité de surface variant de  $e=0.8$  à  $0.95$ .

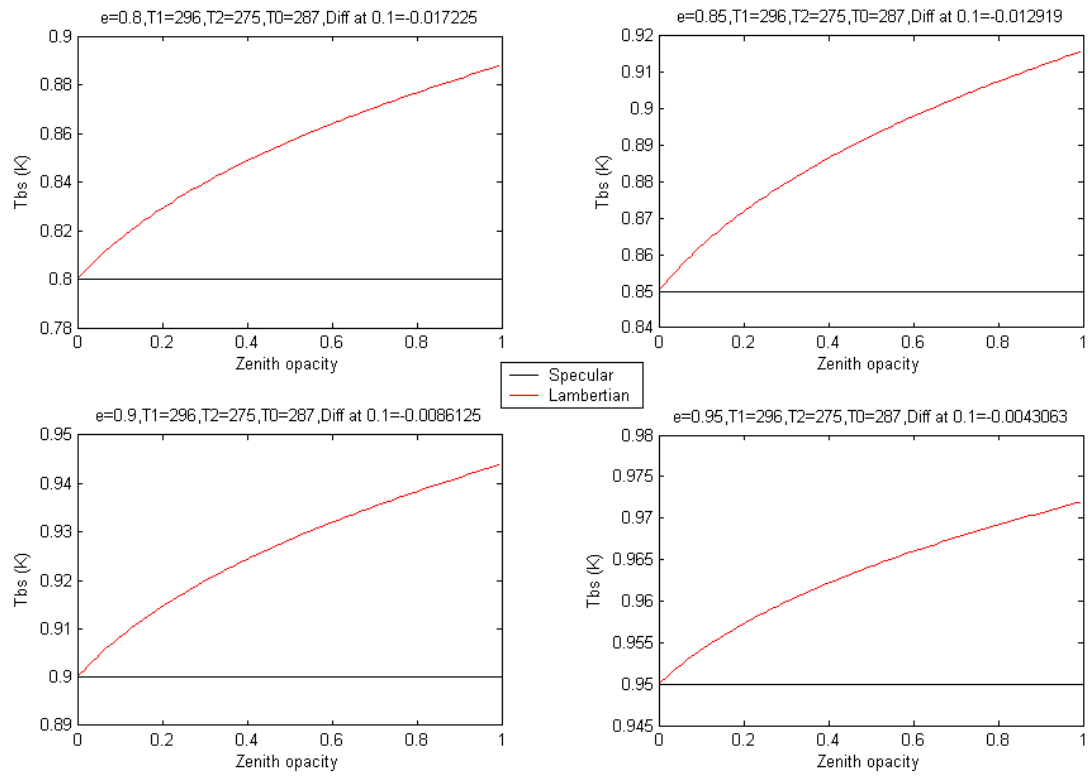


Figure 4-5: Emissivités au nadir en fonction de l'opacité de l'atmosphère pour une surface lambertienne (rouge) et spéculaire (noir) avec une température de surface  $T_0=300$  K, une atmosphère standard et pour une émissivité de : (a)  $e=0.8$ , (b)  $e=0.85$ , (c)  $e=0.9$  et (d)  $e=0.95$ .

### 4.3. EXEMPLE DE CARTES MENSUELLES D' EMISSIVITE DE SURFACE

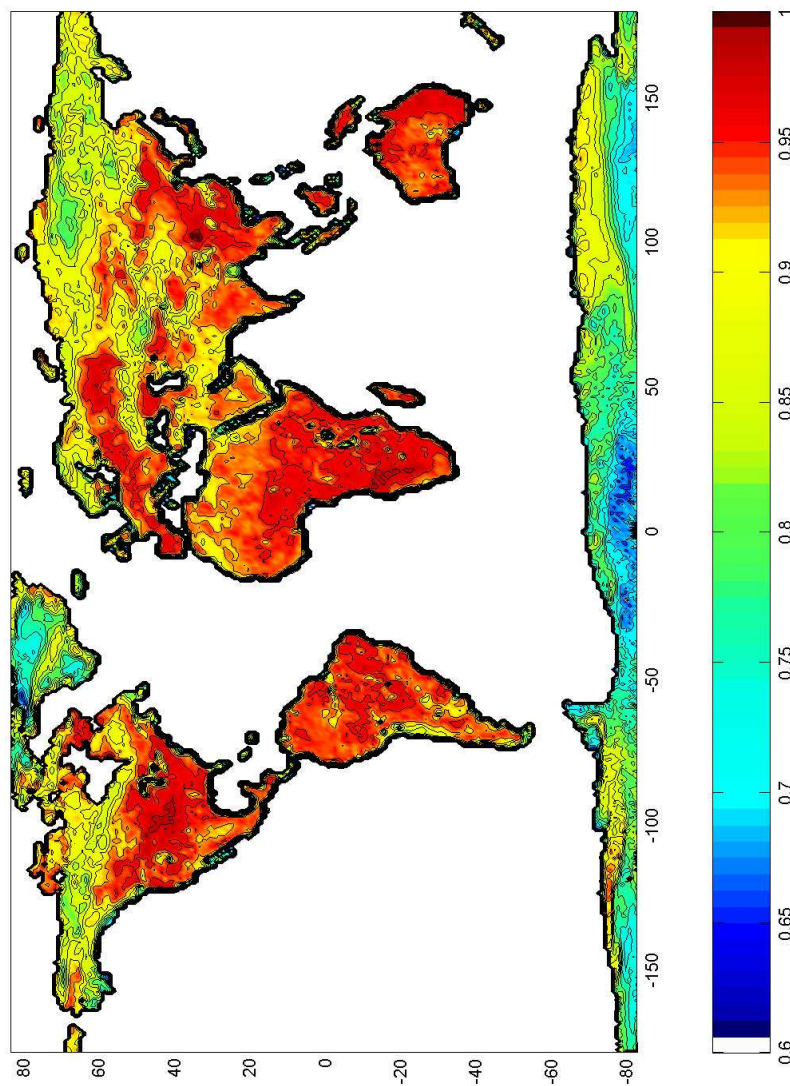


Figure 4-6: Carte moyenne d'émissivité de surface (1°x1°) pour le mois de février 2000 et à la fréquence de 31.4 GHz. Tous les angles d'incidence sont utilisés pour réaliser cette carte.

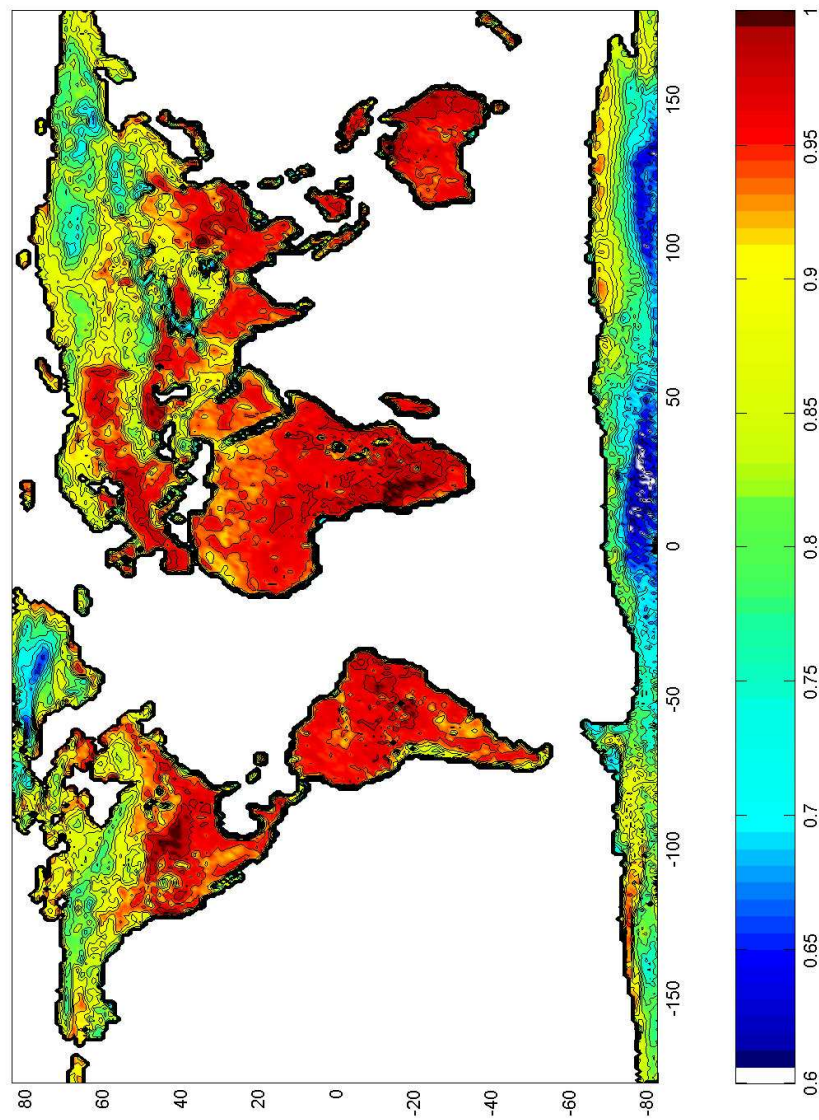


Figure 4-7: Carte moyenne d'émissivité de surface ( $1^\circ \times 1^\circ$ ) pour le mois de février 2000 et à la fréquence de 50.3 GHz. Tous les angles d'incidence sont utilisés pour réaliser cette carte.

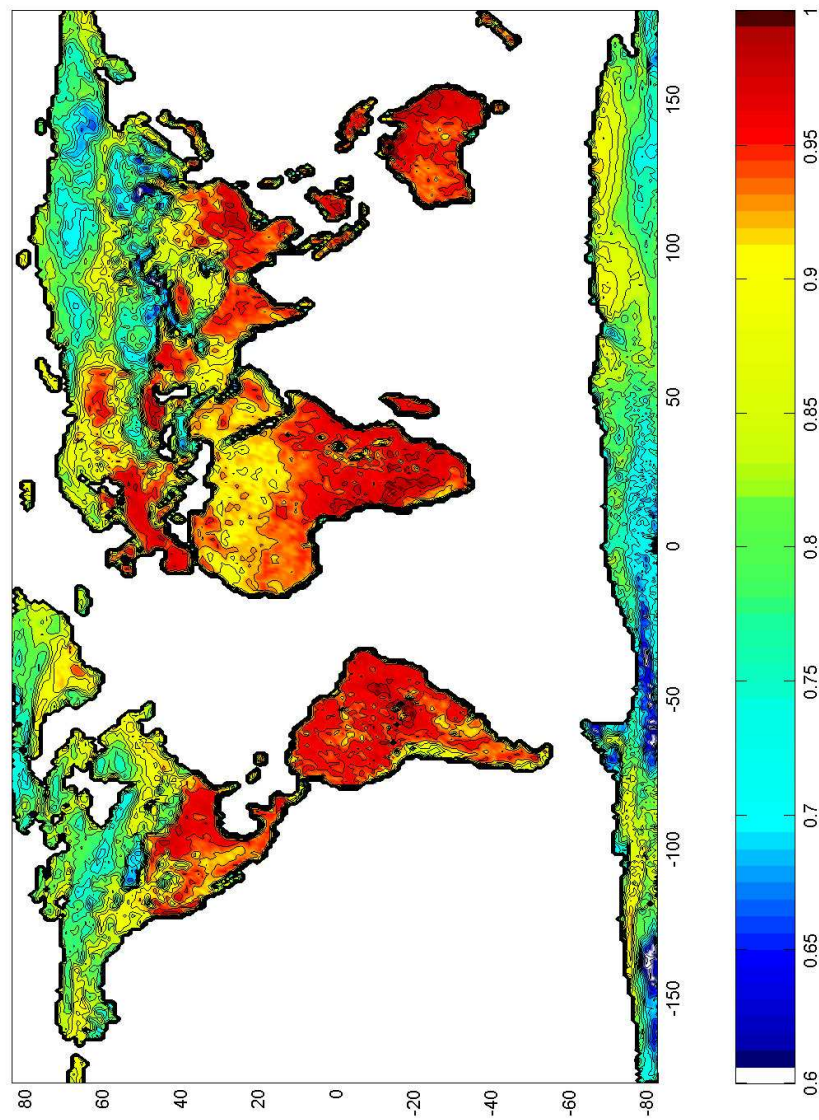


Figure 4-8: Carte moyenne d'émissivité de surface ( $1^\circ \times 1^\circ$ ) pour le mois de février 2000 et à la fréquence de 89 GHz. Tous les angles d'incidence sont utilisés pour réaliser cette carte.



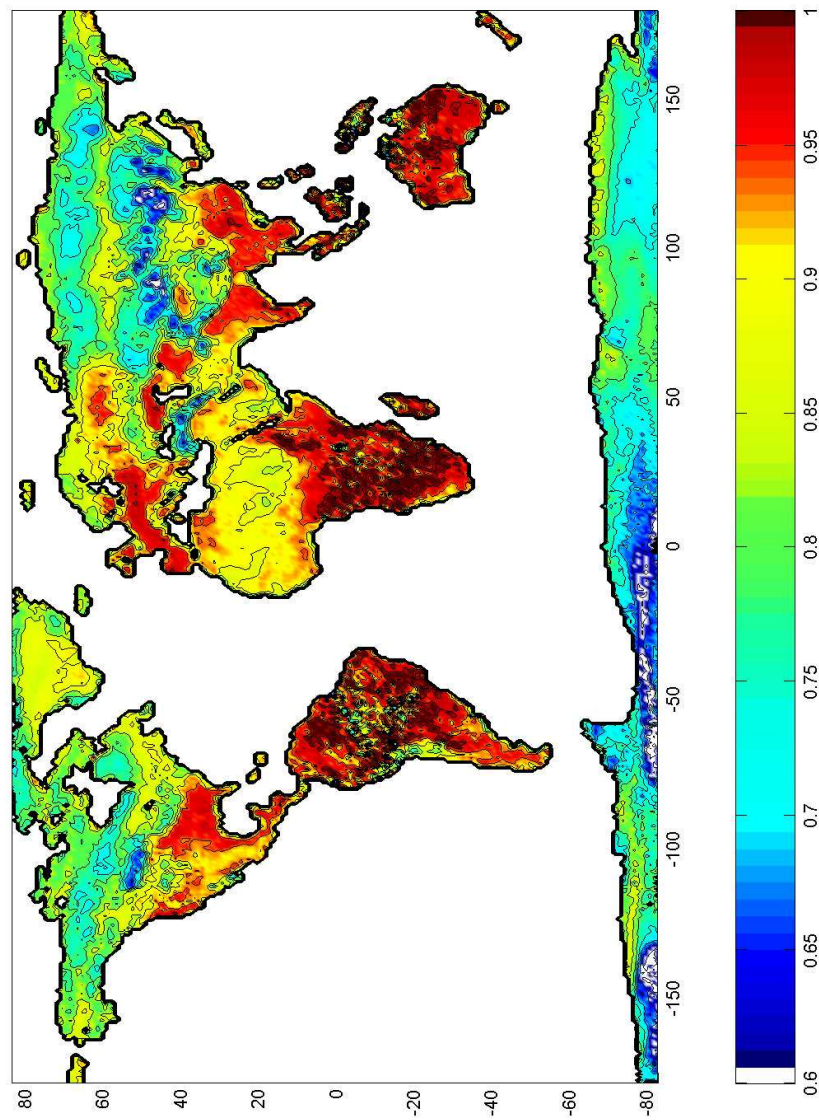


Figure 4-9: Carte moyenne d'émissivité de surface ( $1^\circ \times 1^\circ$ ) pour le mois de février 2000 et à la fréquence de 150 GHz. Tous les angles d'incidence sont utilisés pour réaliser cette carte.



#### 4.4. PUBLICATION ASSOCIEE AU CHAPITRE

Karbou, F., C. Prigent, L. Eymard, and J. Pardo (2004): Microwave land emissivity calculations using AMSU measurements. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, (A paraître)

Article soumis le 29 Avril 2004; Accepté le 29 juillet 2004

# Microwave land emissivity calculations using AMSU measurements

Fatima Karbou, Catherine Prigent, Laurence Eymard, and Juan Pardo

**Abstract**— Atmospheric parameter retrievals over land from AMSU measurements, such as atmospheric temperature and moisture profiles, could be possible using a reliable estimate of the land emissivity. The land surface emissivities have been calculated using 6 months of data, for 30 beam positions (observation zenith angles from  $-58^\circ$  to  $+58^\circ$ ) and the 23.8, 31.4, 50.3, 89, and 150 GHz channels. The emissivity calculation covers a large area including Africa, Eurasia, and Eastern South America. The day-to-day variability of the emissivity is less than 2% in these channels. The angular and spectral dependence of the emissivity is studied. The obtained AMSU emissivities are in good agreement with the previously derived SSMI ones. The scan asymmetry problem has been evidenced for AMSU-A channels. And possible extrapolation of the emissivity from window channels to sounding ones has been successfully tested.

**Index Terms**— AMSU, microwave surface emissivity.

## I. INTRODUCTION

Passive microwave measurements from the Advanced Microwave Sounding Unit (AMSU) A and B on board the National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) polar orbiting satellites are increasingly used over ocean in operational Numerical Weather Prediction (NWP) models.

The AMSU-A sounding channels are used for atmospheric temperature profile retrievals whereas the AMSU-B channels are designed for atmospheric humidity profiling. In addition, AMSU window channels are sensitive to the surface, cloud, and rain, and can be used to derive many parameters such as total precipitable water, sea ice concentration, precipitation rate, or cloud liquid water (see

for instance [8], [28], and [31]). However, AMSU profiling information is still insufficiently exploited over land. The land surface emissivity is high (often close to 1.0) as compared to the ocean one and experiences strong temporal and spatial variations with surface types, roughness, and moisture content, among other parameters. Consequently, it is more difficult to discriminate between the surface and atmosphere contributions over land than over ocean. So far, only the profiling channels that are not sensitive to the surface are operationally used over land. English [4] showed that the use of land emissivity with accuracy better than 2% would help humidity profile retrievals over land. The present study is essentially motivated by the need to improve the low level atmospheric temperature and humidity profiles retrievals over land. It is crucial to estimate accurate land surface emissivities at a global scale for the AMSU channels in order to allow accurate retrievals of the temperature and humidity in the lower atmospheric layers.

Various emissivity model developments have been conducted (see for instance [12] and [29]), but the modeling approaches for global applications are hampered by 1) the complexity of the interaction between the radiation and the large variability of the medium encountered over the globe; 2) the lack of accurate input parameters to feed the model (vegetation characteristics, soil moisture, roughness, among others). Ground based and aircraft measurements of land surface emissivities have been performed, but their extrapolation to surfaces at larger scales is questionable. Airborne microwave measurements have been used to estimate land surface emissivity of forest and agricultural areas [9], and snow and ice surfaces [10] at 24, 50, 89, and 150 GHz. Moreover, ground based microwave emissivity measurements have been performed over variety of vegetation types from bar soils to vegetated areas ([1], [15], [16], and [30] among others).

Land emissivity studies at regional to global scales have already been carried out directly from satellite measurements. Prigent et al. ([23], [24]) estimated the microwave land emissivities over the globe at the frequencies of the Special Sensor Microwave/Imager (SSM/I) channels (19, 22, 35 and 85 GHz) for vertical and horizontal polarizations, at  $53^\circ$  zenith angle by removing the atmosphere, clouds, and rain contributions using

Manuscript number: TGRS-00185-2004.

Received April 29, 2004; revised July 27, 2004.

J. Pardo acknowledges financial support from Spanish DGES and PNIE grants ESP2002-01627, AYA2002-10113-E and AYA2003-02785-E

F. Karbou is with the Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS), CETP, 10-12, Av. de l'Europe, 78140, Vélizy, France.

(Email: [fatima.karbou@cetp.ipsl.fr](mailto:fatima.karbou@cetp.ipsl.fr)).

C. Prigent is with the CNRS, Observatoire de Paris, 61, Av. de l'observatoire, 75014, Paris, France.

L. Eymard is with the CNRS, LODYC, BP 100, 4 Place Jussieu 75252, Paris, France.

J. Pardo is with Consejo Superior de Investigaciones Científicas, IEM-DAMIR, Serrano 121, 28006, Madrid, Spain.

ancillary satellite data. Extrapolation of these estimates to AMSU-A frequencies and scanning conditions has been attempted [22]. Other emissivity calculations have been performed for limited geographic areas. Felde and Pickle [5] retrieved surface emissivities at 91 and 150 GHz for cloud free data from SSM/T2 atmospheric water vapor profiler and radiosonde measurements. Choudhury [2] calculated the surface reflectivity at 19 and 37 GHz using SSM/I data over different surface types. Jones and Vonder Haar [13] proposed a method to routinely generate the microwave land emissivity, using microwave and infrared satellite data. Morland et al. [18] used SSM/I data to compute surface emissivities in semi-arid areas. Similar surface types have been previously sensed using microwave aircraft observations to derive land surface emissivity from 24 GHz to 157 GHz [19].

The goal of this study is to calculate reference land surface emissivity maps at AMSU frequencies and scanning conditions, directly using AMSU observations. The procedures are to get the land emissivities at 23.8, 31.4, 50.3, 89, and 150 GHz for all AMSU zenith angles by removing the contribution of the atmosphere, clouds, and rain. The International Satellite Cloud Climatology Project (ISCCP) data is used to identify cloud-free AMSU observations and to provide an accurate value of the skin temperature [27]. The European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF) temperature-humidity profiles are used to input the Atmospheric Transmission at Microwave (ATM) radiative transfer model that calculates the cloud-free atmospheric contribution [20]. Results are presented for 6 months of AMSU data in 2000, covering a large geographic area (from  $-60^\circ$  to  $+60^\circ$  in longitudes and latitudes). The emissivity retrieval scheme (data and method) for AMSU window channels is described in section II and an error analysis is conducted. The angular and spectral variations of the AMSU emissivities are characterized (section III), and the day-to-day variability is briefly discussed. Extrapolation to the AMSU sounding channels is tested in Section IV. Section V provides the conclusions.

## II. THE LAND SURFACE EMISSIVITY CALCULATION FOR AMSU WINDOW CHANNELS

### A. The data

The AMSU sounding unit is operational on board the NOAA 15 satellite since 1998. It contains two modules A and B. The first one, AMSU-A measures the outgoing radiation from the Earth's surface and from different atmospheric layers using 15 spectral regions (23.8-89.0 GHz). The sounding channels (52.8 to 58 GHz) are used to retrieve the atmospheric temperature information from

TABLE I  
AMSU-A/B CHANNEL CHARACTERISTICS

| Channel No | Frequency (GHz)            | Sensitivity (K) | Resolution at nadir (km) |
|------------|----------------------------|-----------------|--------------------------|
| AMSU-A     |                            |                 |                          |
| 1          | 23.8                       | 0.20            | 48                       |
| 2          | 31.4                       | 0.27            | 48                       |
| 3          | 50.3                       | 0.22            | 48                       |
| 4          | 52.8                       | 0.15            | 48                       |
| 5          | 53.596 $\pm$ 0.115         | 0.15            | 48                       |
| 6          | 54.4                       | 0.13            | 48                       |
| 7          | 54.9                       | 0.14            | 48                       |
| 8          | 55.5                       | 0.14            | 48                       |
| 9          | 57.290 $\pm$ $f_0$         | 0.20            | 48                       |
| 10         | $f_0 \pm 0.217$            | 0.22            | 48                       |
| 11         | $f_0 \pm 0.322 \pm 0.048$  | 0.24            | 48                       |
| 12         | $f_0 \pm 0.322 \pm 0.022$  | 0.35            | 48                       |
| 13         | $f_0 \pm 0.322 \pm 0.010$  | 0.47            | 48                       |
| 14         | $f_0 \pm 0.322 \pm 0.0045$ | 0.78            | 48                       |
| 15         |                            | 0.11            | 48                       |
| AMSU-B     |                            |                 |                          |
| 16         | 89                         | 0.37            | 16                       |
| 17         | 150                        | 0.84            | 16                       |
| 18         | 183.31 $\pm$ 1             | 1.06            | 16                       |
| 19         | 183.31 $\pm$ 3             | 0.70            | 16                       |
| 20         | 183.31 $\pm$ 7             | 0.60            | 16                       |

about 3 hPa (45 km) to the Earth's surface. AMSU-A is composed of two separate units: AMSU-A1 with 12 channels in the frequency range 50-60 GHz bands and one channel at 89 GHz, and AMSU-A2 unit with 2 surface channels at 23.8 and 31.4 GHz. Moreover, the AMSU-A1 unit benefits of 2 antenna systems to provide measurements from 50 GHz to 89 GHz. AMSU-B is designed for humidity sounding and has two window channels at 89 and 150 GHz and three other channels centered on the 183.31 GHz water vapor line. AMSU A and B have a nominal field of view of  $3.3^\circ$  and  $1.1^\circ$  and sample 30 and 90 Earth views respectively. Thereby, the AMSU observation scan angle  $\theta_s$  varies from  $-48^\circ$  to  $+48^\circ$ . Consequently, the corresponding local zenith angle could reach  $58^\circ$ . Channel characteristics for both AMSU-A and AMSU-B radiometers are given in Table I and a detailed description of the AMSU sounders is reported in [7]. In the present study, level 1b AMSU data from year 2000 have been obtained from the Satellite Active Archive (SAA) and processed using the Advanced ATOVS Processing Package (AAPP) created and distributed by EUMETSAT and co-operations. The AMSU radiances are corrected from the AMSU antenna effect ([17], [11]).

Clouds have a great impact on the observed microwave radiances. Therefore, cloudy situations should not be accounted for in the emissivity calculation. Cloud parameters and skin temperature are extracted from the ISCCP pixel level data (the DX data set) for year 2000. These parameters are available at 30 km ground resolution and every 3 hours. Within ISCCP, information about clouds is obtained from visible and infrared measurements from

polar and geostationary satellites, using radiative analysis [27]. With an infrared emissivity close to 1.0, observations in the thermal infrared region can provide estimates of the surface skin temperature in cloud free situations. In the assumption of unit surface emissivity, clear infrared radiances are used by the ISCCP processing to derive estimates of the skin temperature. The retrieved skin temperatures are further corrected to account for the emissivity change with surface types. The skin temperature accuracy is assumed to be within 4 K as reported by Rossow and Garder ([25], [26]).

The cloud-free atmospheric contribution is calculated via radiative transfer simulations using as input the ECMWF temperature-humidity profiles. The profiles we used are from the ECMWF ERA40 re-analysis for 2000 available globally, every 6 hours, for 60 vertical pressure levels, and for a horizontal grid resolution of 1.125°x1.125°.

### B. The emissivity calculation

In the AMSU microwave frequencies range, for a non scattering plane-parallel atmosphere and, for a given path zenith angle, the brightness temperature ( $T_b$ ) observed by the satellite instrument can be expressed as:

$$T_{b(p,\vartheta)} = (T_{skin} \times \varepsilon_{(p,\vartheta)} \times \Gamma) + (T_{(\vartheta,\downarrow)} \times (1 - \varepsilon_{(p,\vartheta)}) \times \Gamma) + T_{(\vartheta,\uparrow)} \quad (1)$$

$$\Gamma = \exp(-\tau_{(0,H)} / \cos(\theta_z)) \quad (2)$$

$T_{b(p,\vartheta)}$  and  $\varepsilon_{(p,\vartheta)}$  are the instrument  $T_b$  and the surface emissivity at frequency  $\nu$  and for polarization  $p$ , respectively.  $T_{skin}$ ,  $T_{(\vartheta,\downarrow)}$  and  $T_{(\vartheta,\uparrow)}$  are the skin temperature, the upwelling and the downwelling  $T_b$ s respectively.  $\Gamma$  is the net atmospheric transmissivity.

Equation (1) leads to the land emissivity expression:

$$\varepsilon_{(p,\vartheta)} = (T_{b(p,\vartheta)} - T_{(\vartheta,\uparrow)} - T_{(\vartheta,\downarrow)} \times \Gamma) / ((T_{skin} - T_{(\vartheta,\downarrow)}) \times \Gamma) \quad (3)$$

For the emissivity estimation, we took into account all AMSU cloud-free observations and all AMSU-A zenith angles (30 values from  $-58^\circ$  to  $+58^\circ$ ). The radiative transfer computations are performed using the ATM model. This model, based on different developments and measurements described in [20], is fully applicable in the 0-1600 GHz frequency range and has been evaluated by inter-comparisons with other existing radiative transfer models [6].

### C. The emissivity sensitivity to errors in the input parameters

So far, there are no extensive *in-situ* emissivity measurements that could be compared to the retrieved

TABLE II  
AMSU EMISSIVITY SENSITIVITY TO ERRORS IN THE: (A) AIR HUMIDITY PROFILES, (B) AIR TEMPERATURE PROFILES, (C) SKIN TEMPERATURE, AND (D) INSTRUMENT BRIGHTNESS TEMPERATURE

| Frequencies (GHz)                                   | $\theta \leq 45^\circ$<br>30200 points | $\theta > 45^\circ$<br>6886 points | TPW $\leq 30$ g/m <sup>2</sup><br>26472 points | TPW $> 30$ g/m <sup>2</sup><br>10616 points |
|---|--|------------------------------------|--|---|
| Air humidity errors (mean/std)                      |  |                                    |  |   |
| 23.8  | -0.001 / 0.001                         | -0.002 / 0.002                     | -0.001 / 0.001                                 | -0.001 / 0.003                              |
| 31.4  | -0.001 / 0.001                         | -0.002 / 0.002                     | -0.001 / 0.001                                 | -0.003 / 0.003                              |
| 50.3  | -0.001 / 0.001                         | -0.002 / 0.002                     | -0.001 / 0.001                                 | -0.003 / 0.004                              |
| 89.0  | -0.005 / 0.005                         | -0.009 / 0.008                     | -0.006 / 0.004                                 | -0.010 / 0.014                              |
| 150   | -0.004 / 0.015                         | -0.006 / 0.035                     | -0.007 / 0.012                                 | 0.023 / 0.056                               |
| Air temperature errors (mean/std)                   |  |                                    |  |   |
| 23.8  | -0.001 / 0.001                         | -0.001 / 0.001                     | -0.001 / 0.001                                 | -0.002 / 0.001                              |
| 31.4  | -0.001 / 0.001                         | -0.001 / 0.001                     | -0.001 / 0.001                                 | -0.001 / 0.001                              |
| 50.3  | -0.005 / 0.001                         | -0.010 / 0.001                     | -0.006 / 0.002                                 | -0.008 / 0.003                              |
| 89.0  | -0.002 / 0.001                         | -0.003 / 0.003                     | -0.002 / 0.001                                 | -0.008 / 0.004                              |
| 150   | -0.008 / 0.010                         | -0.017 / 0.027                     | -0.007 / 0.007                                 | -0.045 / 0.036                              |
| Skin temperature errors (mean/std)                  |  |                                    |  |   |
| 23.8  | -0.028 / 0.002                         | -0.029 / 0.002                     | -0.028 / 0.002                                 | -0.031 / 0.002                              |
| 31.4  | -0.028 / 0.002                         | -0.027 / 0.002                     | -0.027 / 0.002                                 | -0.028 / 0.002                              |
| 50.3  | -0.036 / 0.003                         | -0.041 / 0.004                     | -0.037 / 0.003                                 | -0.038 / 0.004                              |
| 89.0  | -0.030 / 0.002                         | -0.031 / 0.004                     | -0.030 / 0.002                                 | -0.035 / 0.004                              |
| 150   | -0.037 / 0.009                         | -0.042 / 0.016                     | -0.037 / 0.008                                 | -0.062 / 0.017                              |
| Instrument brightness temperature errors (mean/std) |  |                                    |  |   |
| 23.8  | 0.008 / 0.001                          | 0.009 / 0.001                      | 0.008 / 0.001                                  | 0.011 / 0.001                               |
| 31.4  | 0.008 / 0.001                          | 0.008 / 0.001                      | 0.008 / 0.001                                  | 0.008 / 0.001                               |
| 50.3  | 0.015 / 0.002                          | 0.021 / 0.003                      | 0.016 / 0.003                                  | 0.018 / 0.004                               |
| 89.0  | 0.010 / 0.002                          | 0.012 / 0.004                      | 0.010 / 0.002                                  | 0.017 / 0.005                               |
| 150   | 0.024 / 0.027                          | 0.054 / 0.102                      | 0.021 / 0.017                                  | 0.138 / 0.151                               |

emissivity in order to directly evaluate the emissivity estimate errors. Therefore, the accuracy of the estimated microwave emissivity to errors in the input parameters is evaluated by analyzing its change due to a variation in one of them, the other parameters remaining unchanged. The accuracy evaluation is performed for 5 days of AMSU-A and B cloud-free data from early January 2000.

For example, the impact of humidity profile errors on the microwave emissivity is estimated by calculating the emissivity variation due to an alteration of  $\pm 15\%$  in the humidity profile. The same approach is used to determine the emissivity variation due to the air temperature profile ( $\pm 1$  K at all pressure levels), to the instrument  $T_b$  ( $\pm 1$  K), and to the skin temperature ( $\pm 4$  K). The emissivity variations are calculated at 23.8, 31.4, 50.3, 89, and 150 GHz, for four observation classes: (a) low zenith angles ( $< 45^\circ$ ), (b) high zenith angles ( $> 45^\circ$ ), (c) dry atmospheres (Total Water Vapor Content (TWVC)  $< 30$  kg/m<sup>2</sup>), and (d) moist conditions (TWVC  $> 30$  kg/m<sup>2</sup>). The corresponding results are given in Table II. Calculations are not shown for the other AMSU frequencies that are located near the oxygen and water vapor lines. At these frequencies with low atmospheric transmission, the surface contribution to the measured radiation is not large enough to provide reliable emissivity estimates. In the following section, the emissivity frequency dependence will be discussed and a solution will be provided and tested to estimate the emissivities in these opaque channels from the near-by window frequency observations.

Table II shows that for all window channels, the emissivity decreases when the air mixing ratio, the surface temperature, or air temperature increases. On the contrary, an increase in the instrument  $T_b$  enhances the estimated

TABLE III  
BIOSPHERE-ATMOSPHERE TRANSFER SCHEME (BATS) VEGETATION CLASSES

| Classes | Legend                     | Total number of selected AMSU observations during January 2000 |
|---------|----------------------------|--|
| 1       | Crops, Mixed Farming       | 28819  |
| 2       | Short Grass                | 15570  |
| 3       | Evergreen Needleleaf Trees | 1459   |
| 4       | Deciduous Needleleaf Tree  | 218  |
| 5       | Deciduous Broadleaf Trees  | 4419   |
| 6       | Evergreen Broadleaf Trees  | 11253  |
| 7       | Tall Grass                 | 22444  |
| 8       | Desert                     | 90797  |
| 9       | Tundra                     | 123  |
| 10      | Irrigated Crops            | 167  |
| 11      | Semi-desert                | 28876  |
| 12      | Ice Caps and Glaciers      | 0  |
| 13      | Bogs and Marshes           | 850  |
| 14      | Inland Water               | 0  |
| 16      | Evergreen Shrubs           | 2134   |
| 17      | Deciduous Shrubs           | 3994   |
| 18      | Mixed Forest               | 1263   |
| 19      | Interrupted Forest         | 43166  |
| 20      | Water and Land Mixtures    | 0  |

emissivity. At all frequencies, the emissivity variation due to errors in one input parameter is larger for high TWVC and for high observation zenith angles: this is explained by the fact that increasing TWVC as well as increasing zenith angle result on a decrease in the atmospheric transmissivity and, therefore, less sensitivity to the surface contribution. Errors in the humidity profiles have little effects on the surface channels 23.8, 31.4 and 50.3 GHz (less than 0.25% of relative error ( $d\epsilon/\epsilon$ )).

However, their impact is greater on the 89 and 150 GHz emissivities: in dry atmospheres or for low zenith angles, the emissivity sensitivity is five times greater at these two channels than at the 23.8 GHz one. This effect is enhanced for very moist conditions and large zenith angles, with errors rising up to 1.1% at 89 GHz and 4% at 150 GHz. Errors in skin temperatures greatly influence the retrieved emissivity at all frequencies. For dry conditions, the emissivity relative errors are about 3% for 23.8 and 31.4 GHz, 3.5% at 50 and 89 GHz, and 4% at 150 GHz. As expected, errors in the air temperature profile produce larger emissivity variations at 50 GHz than at other frequencies that are located farther away from the oxygen absorption bands.

In order to reduce the calculation errors, the emissivity calculations will be averaged over a certain period of time. The time variability will be analyzed and compared to the theoretical noise errors previously calculated. Note that contrarily to SSM/I observations, AMSU measurements are performed at various incidence angles, thus limiting the number of overpasses per location with the same observation conditions.

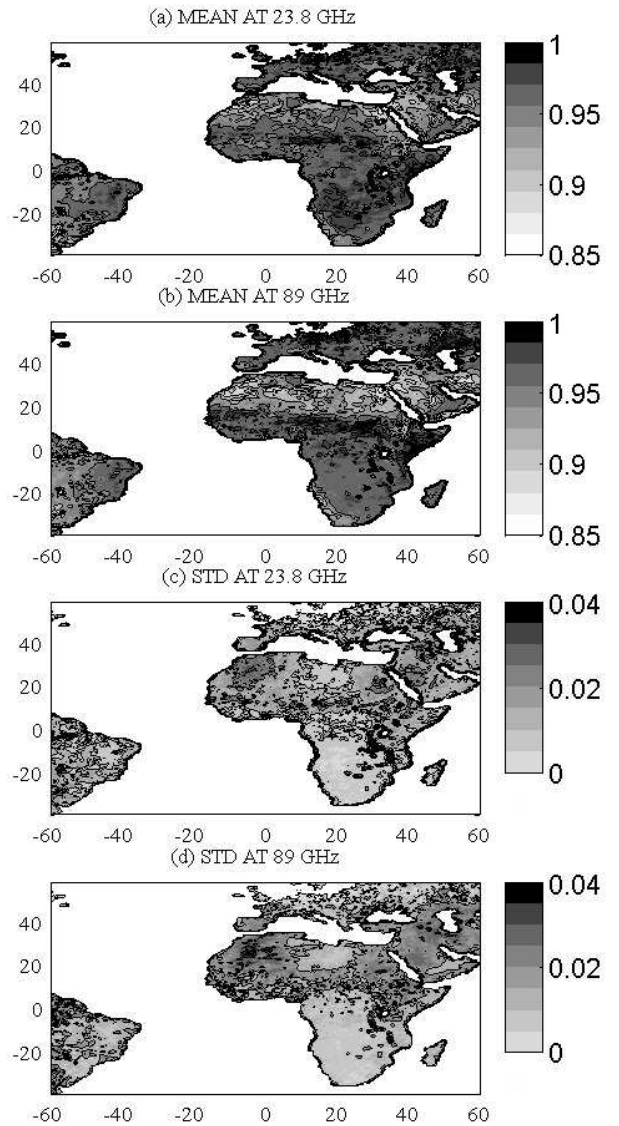


Figure 1: (a) Mean emissivity for July 2000 for low zenith angles ( $\leq 45^\circ$ ) at 23.8 GHz, (b) same as (a) but at 89 GHz, (c) Emissivity standard deviation for July 2000 for low zenith angles ( $\leq 45^\circ$ ) at 23.8 GHz, (d) same as (c) but at 89 GHz.

### III. AMSU LAND EMISSIVITY ANALYSIS

#### A. Emissivity maps

Monthly mean emissivity maps are shown on Figure 1.a and 1.b, at 23.8 and 89 GHz respectively, for July 2000, averaged over zenith angles lower than  $45^\circ$ . All available cloud-free AMSU observations are used to produce these maps at a 30x30 km resolution. The corresponding emissivity standard deviation maps are also presented

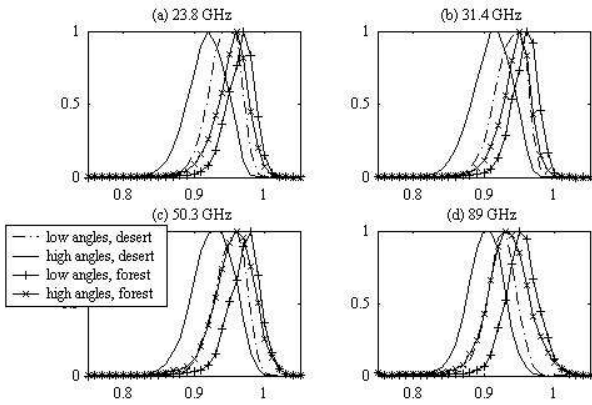


Figure 2: Histograms of the emissivity from February 2000, for low zenith angles and desert (angles  $\leq 45^\circ$ , dashed-dotted curve), for high zenith angles and desert (angles  $> 45^\circ$ , solid curve), for low zenith angles and forest (solid curve with plus symbols) and for high zenith angles and forest (solid curve with cross symbols) at (a) 23.8 GHz, (b) 31.4 GHz, (c) 50.3 GHz, and (d) 89 GHz.

(Figure 1.c and 1.d).

The monthly mean emissivity maps show expected spatial structures, related to changes in surface types. Lakes and rivers as well as the coastlines are associated with low emissivities at all frequencies. Compared to other medium, water has high dielectric values that translate into low emissivities. The Victoria, Malawi, and Tanganyika lakes are easily distinguished. Open water areas are also associated with the highest emissivity variability (see Figure 1.c and 1.d). At the border between land and open water, the percentage of each contribution (land and water) can change between two satellite overpassings because they are not perfectly coincident in space, leading to significant emissivity changes. The emissivity also changes with vegetation cover. We used the Biosphere-Atmosphere Transfer Scheme (BATS) vegetation land cover data set (available at 30x30 km grid resolution) for vegetation classification [3]. Table III lists the different vegetation classes available in the dataset. Bare soil areas (like desert regions in North Africa and Arabia) are characterized by lower emissivity. They have a quasi-specular behavior. On the other hand, dense vegetation areas have a quasi-lambertian reflection associated to rather high emissivity. This is confirmed by the emissivity histograms calculated using February 2000 data at 23.8, 31.4, 50.3, and 89 GHz (Figure 2.a, 2.b, 2.c and 2.d respectively). The histograms are established for two zenith angle classes (angles  $\leq 45^\circ$  and angles  $> 45^\circ$ ) and for desert and dense vegetation areas (see Figure 2a-d). As expected, and for all frequencies, the emissivity is higher at low zenith angles than at higher ones for desert areas. The emissivity change due to the zenith angle (difference between the mean emissivity for low angles and the mean emissivity for high angles) is about 0.024 for 23.8 and 31.4 GHz and 0.023 for 50.3 and 89 GHz. The emissivity change for a dense vegetation area is smaller: less than 0.009 for channels 1 and 2 and about 0.01

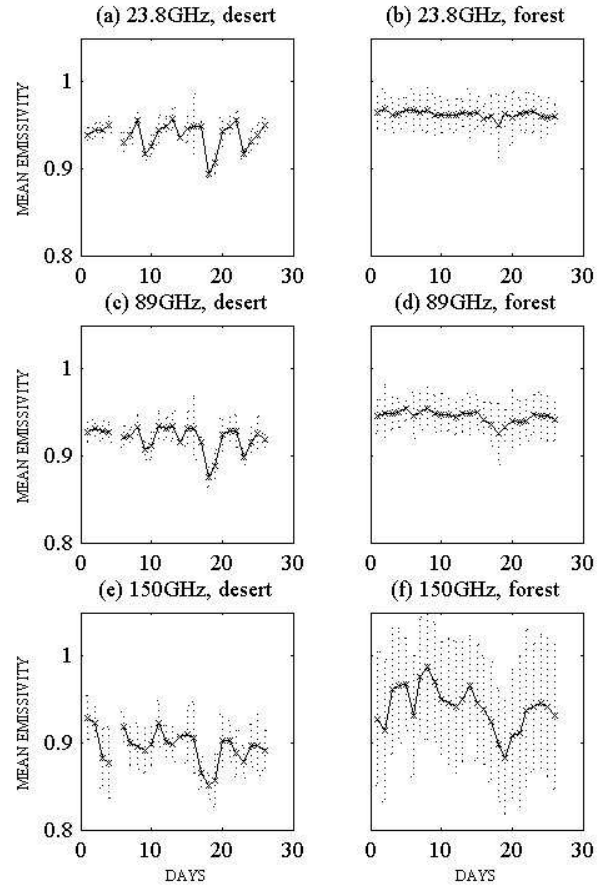


Figure 3: The day-to-day variation of the emissivity over a desert surface at (a) 23.8, (c) 89 and (e) 150 GHz; and over a tropical forest in Africa at (b) 23.8, (d) 89 and (f) 150 GHz.

for the two others. We examine in detail the emissivity variation depending on zenith angle in the next section. In the desert, two particular areas of very low emissivities will be noted, one in the South of Arabia (Western Oman, Eastern Yemen) and another one in Egypt. These regions also show low emissivities on the maps derived from SSM/I observations. They have been showed to be related to geological structures [21] but no final explanation exists yet despite on-going assiduous investigations (dielectric measurement of rocks and sand from those regions along with modeling studies).

### B. Day-to-day emissivity variations

As shown by Figure 1c & 1d, the day-to-day emissivity standard deviations for 1 month are generally within 0.02 for all channels, i.e. within the required theoretical limit calculated by *English* [4]. As expected, they tend to increase with frequency, given the increasing sensitivity to atmospheric contamination and sensitivity to surface errors (see section II.C). As already discussed, areas with higher variations are often associated with the presence of standing

water (coastal areas, flood regions). For the month of July shown here (Figure 1), the subsahelian transition zone in Africa is associated with rather large emissivity variations. This fact is likely related to the rainy season in this region at this period of the year with two consequences: 1) potential cloud contamination is likely, 2) rain-induced soil moisture variation along with the corresponding vegetation changes can lead to important emissivity variations.

In order to further evaluate the day-to-day variation of the estimated emissivity, two areas with different vegetation cover have been selected. We calculate for them the mean daily emissivity during the month of January 2000 at 23.8, 31.4, 50.3, 89, and 150 GHz. To avoid the emissivity variation due to the zenith angles, data at angles less than  $45^\circ$  are selected. Moreover, all water pixels (lakes and rivers) are removed for the calculation to avoid the emissivity change between land and water surfaces.

The calculation results are shown on Figure 3 (a-f). Figures 3a, c and e show the day-to-day variation of the emissivity over a desert area in Mauritania (15W 10W; 20N 25N) at 23.8, 89 and 150 GHz respectively. The mean emissivity curve has the same trend for all frequencies. Error bars are larger for 89 and 150 GHz, which is consistent with the error analysis provided in the section II.C. The emissivity variation is not only due to errors in the input parameters: it can also correspond to real changes in surface properties. Between day 15 and day 20, a significant emissivity decrease can be observed. We checked on the ISCCP cloud data set that it corresponds to the overpassing of a significant convective activity in the region, likely associated to rain and induced soil moisture increase. Figures 3b, d, and f present the day-to-day variation of the emissivity over a tropical forest in Africa (18W 10W; 0N 10N) at 23.8, 89, and 150 GHz, respectively. For all channels (except the 150 GHz), the emissivity remains almost unchanged during the month. At 150 GHz, the emissivity is associated with large daily variability that can be related to the sensitivity of this channel to input errors especially for high TWVC situations.

### C. Angular dependence of the AMSU emissivity

The cross-track scanning pattern of the AMSU instrument provides observation angles between  $\pm 58^\circ$ . In addition, because of the rotating AMSU antenna, the estimated emissivity is a mixture between the vertical and the horizontal polarizations. The AMSU emissivity at scan angle  $\theta_z$  could be written as follows:

$$\varepsilon(\theta_z) = \varepsilon_p(\theta_z) \times \cos^2(\theta_s) + \varepsilon_q(\theta_z) \times \sin^2(\theta_s) \quad (4)$$

Where:

$\varepsilon_p(\theta_z)$  and  $\varepsilon_q(\theta_z)$  are the two orthogonal polarized surface emissivities at  $\theta_z$  local zenith angle. For AMSU surface

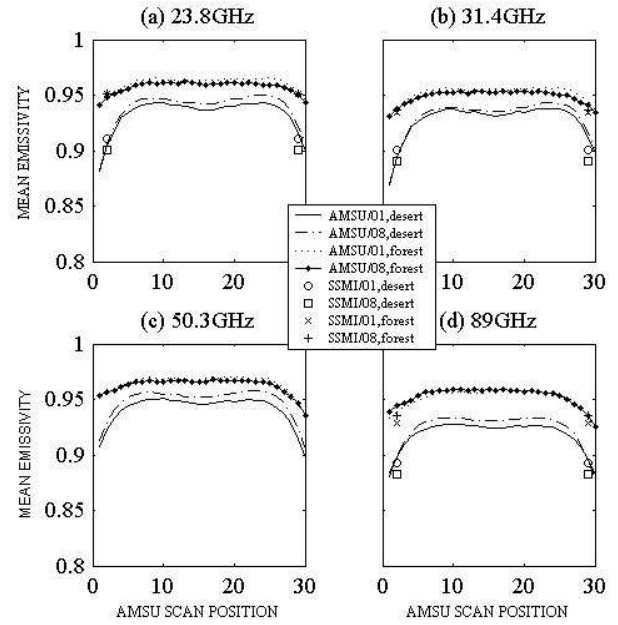


Figure 4: Monthly mean AMSU emissivities with respect to 30 scan positions ( $\pm 58^\circ$  of zenith angle variation) and two surface types: desert (solid lines for January and dashed-dotted lines for August) and forest (dotted lines for January and solid-dotted lines for August): (a) at 23.8 GHz with SSMI emissivities at  $53^\circ$  and at 19 GHz, (b) same as (a) but at 31.4 GHz with SSMI emissivities at 37 GHz, (c) same as (a) but at 50.3 GHz, (d) same as (a) but at 89 GHz with SSMI emissivities at 85 GHz.

channels, the polarization is vertical near nadir and thereby,  $\varepsilon_p$  is equal to  $\varepsilon_v$  and  $\varepsilon_q$  is equal to  $\varepsilon_h$ .

In order to examine the emissivity variation with the zenith angle, the calculated emissivities have been sorted by beam position and vegetation type (nadir corresponds to scan positions 15 and 16). The resulting monthly mean emissivities for desert and dense vegetation are presented on figure 4 for January and August 2000. Regarding each vegetation class, SSMI emissivities for January 1993 and August 1992 (obtained from Prigent et al. [24]) at 19, 37 and 85 GHz and for  $53^\circ$  zenith angle (scan positions 2 and 29), recalculated for an AMSU like polarization (using (4)) are added to the plots for comparison. For example, at 23.8 GHz, we add the estimated SSMI emissivity at 19 GHz for  $53^\circ$ . For both vegetation types and for all channels, we notice a very good agreement between the AMSU emissivities at zenith angles close to  $53^\circ$  and the SSMI ones. The figure shows the strong dependence of the AMSU emissivity with the zenith angles over desert areas. We observe the same behavior over semi-desert areas (see figure 5). For forested areas, the dependence is much smaller, as expected: dense vegetation is associated with quasi-lambertian reflection and thereby the observation angle has a limited impact. Additional plots using January data are provided on figure 5, for 9 vegetation classes and for all surface channels (23-150 GHz).

The results show also an asymmetry along the AMSU

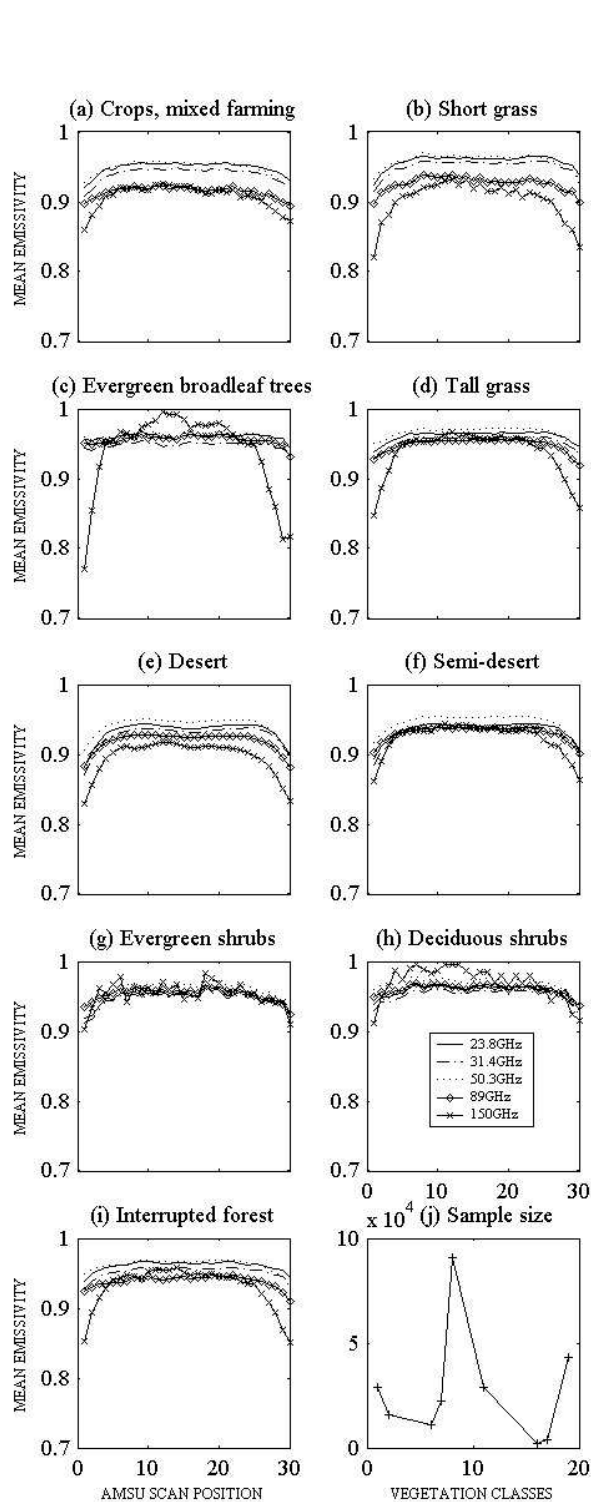


Figure 5: Monthly mean AMSU emissivities for January 2000 with respect to 30 scan positions ( $\pm 58^\circ$  of zenith angle variation) and 9 surface types at 23.8, 31.4, 50.3, 89 and 150 GHz. The sample size curve for each vegetation class (see Table II) is plotted on (j).

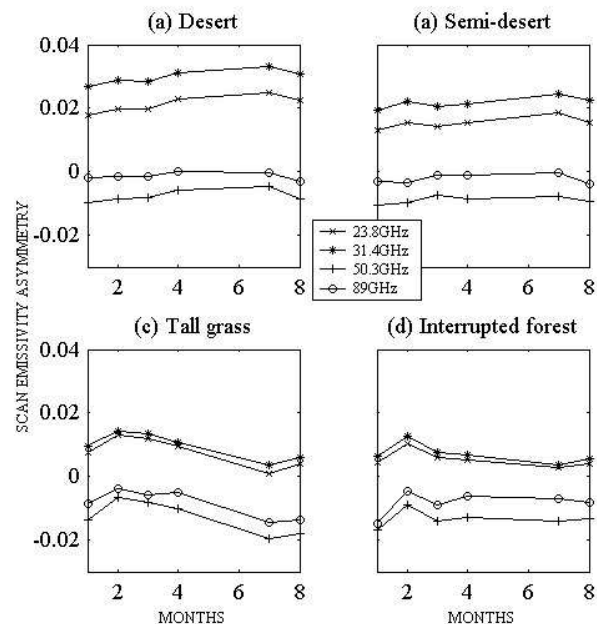


Figure 6: Monthly scan asymmetry (monthly mean emissivity at scan position 30, minus monthly mean emissivity at scan position 1) for 23.8 GHz (solid lines with cross symbol), 31.4 GHz (solid lines with star symbol), 50 GHz (solid lines with plus symbol) and, 89 GHz (solid lines with circle symbol) regarding: (a) desert, (b) semi-desert), (c) Tall grass, and (d) Interrupted forest.

surface emissivity. To highlight this effect, we have calculated the difference between the monthly mean emissivities at the scan edges (scan positions 1 and 30) for different vegetation covers, for 6 months of data, at 23.8, 31.4, 50.3, and 89 GHz (see figure 6). For all surfaces, the asymmetry (monthly mean emissivity at scan position 30 minus the monthly mean emissivity at scan position 1) is always positive for 23.8 and 31.4 GHz (both channels are located on the AMSU-A1 module) and always negative for 50.3 and 89 GHz (measurements at these frequencies are obtained from the AMSU-A2 module). For all vegetation classes, the AMSU scan asymmetry is higher at 31.4 GHz than at the other frequencies. The maximum bias at this frequency is about 0.033 and is observed over desert surfaces (surface with the lowest emissivity). Notice that 0.033 in emissivity scan asymmetry could represent 9 K in terms of Tb (assuming a skin temperature of 300 K and an atmospheric transmissivity of 0.9). Channel 2 (23.8 GHz) is located on the same module (AMSU-A1) than channel 1 (31.4 GHz), but is less sensitive to the asymmetry; the maximum asymmetry is less than 0.024. Measurements at 89 GHz appear to be less sensitive to the scan asymmetry than those at 50.3 GHz. Weng et al. [28] also noticed an asymmetry in the AMSU 31GHz channel by using observations and simulations over an ocean background surface. The AMSU scan asymmetry could be related to an instrument problem. For performant retrievals of atmospheric parameter over ocean and land, the instruments



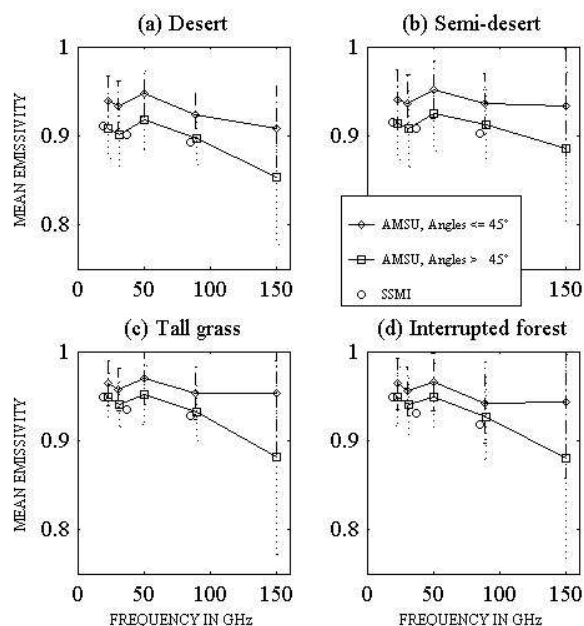


Figure 7: Monthly mean emissivities from January 2000 with respect to the frequency for low zenith angles ( $\leq 45^\circ$ , solid lines with diamond symbols) and high zenith angles ( $> 45^\circ$ , solid lines with square symbol) for (a) Desert, (b) Semi-desert, (c) Tall grass, and (d) Interrupted forest. For each vegetation class, the corresponding SSMI emissivities at 19, 37 and 85 GHz (circle symbols) are added as well as the AMSU emissivity standard deviations.

have to be accurately calibrated for all conditions (frequencies and scanning positions). Further studies should investigate this asymmetry problem over land and ocean surfaces to suggest adequate corrections.

#### D. Frequency dependence of the AMSU emissivity

Figure 7 shows the monthly mean emissivities for dry and vegetated surfaces calculated using January data, at AMSU window channels between 23.8 and 150 GHz and for high ( $>45^\circ$ ) and low ( $\leq 45^\circ$ ) zenith angles. For comparison purposes, SSMI emissivities at 19, 3, 7, and 85 GHz, at  $53^\circ$  for January 1993 are added to the plots (using the polarization mixing from (4)). For bare soil (figure 7.a, 7.b) and vegetated areas (figure 7.c and 7.d), the frequency dependence of the AMSU emissivities at high zenith angles is in very good agreement with the ones derived from SSMI estimates. For all considered vegetation classes and both high and low zenith angles, the emissivity slightly decreases from 23 to 31 GHz and then increases at 50 GHz.

The amplitude of the increase at 50 GHz does not depend significantly upon scan angle or TWVC (similar trend over desert and tropical forest). This could be due at least to two factors: absolute instrument calibration error at 50 GHz and systematic errors in the gaseous absorption calculation at this frequency. Additional investigations have to be

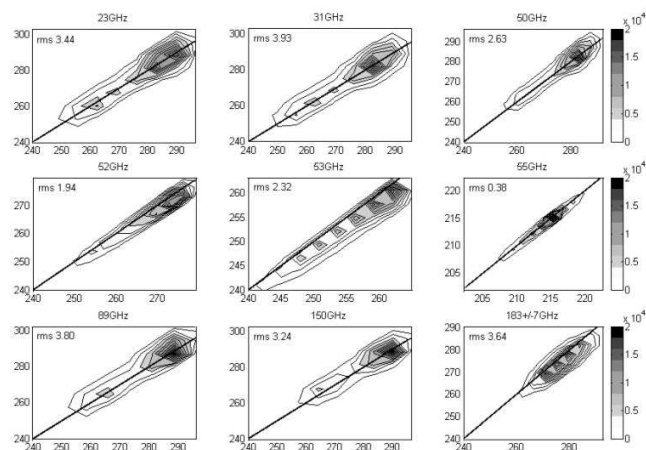


Figure 8: Density contours of the observed brightness temperature (X axis) versus the simulated brightness temperature (Y axis) over land using odd January 2000 days data for AMSU channels 23.8, 31.4, 50.3, 52.8, 53, 89, 150 and 183+/-7GHz. The RMS of errors for (observations-simulations) is added to the plots. The color bar indicates the observations number for each contour class.

performed, both over ocean and land to understand this problem. At 23.8, 31.4, and 50 GHz, error bars have the same magnitude for low zenith angles and for all surface types and are smaller than at 89 and 150 GHz. For all channels, the error bars increase with increasing zenith angles. The channels 89 and 150 GHz are more sensitive to residual atmospheric errors leading to increasing error bars; this effect is intensified at 150 GHz for moist conditions and high zenith angles. The observed emissivity decreases in vegetated areas at high zenith angles between 89 and 150 GHz is not realistic. In section II.C, it has been shown that the 150 GHz channel is particularly sensitive to errors in all calculation input parameters. This is also evidenced by the large error bars associated with the emissivity estimates at this frequency (almost 0.07 for tall grass vegetation type as compared to 0.03 for the other frequencies). For low zenith angles, the emissivity does not change much from 89 and 150 GHz for both dry and vegetated areas: the emissivity estimate at 150 GHz being very noisy, emissivity estimates at 89 GHz could be used for the 150 GHz channel, at least for low zenith angle. We have checked this assumption in the next section by using emissivities at 89 GHz to calculate the Tb at 150 GHz.

#### IV. EXTRAPOLATION OF THE CALCULATED LAND SURFACE EMISSIVITIES TO THE SOUNDING CHANNELS

The emissivity calculations have been performed and analyzed for the AMSU window channels. As already mentioned, similar calculations for sounding channels would not be adequate, due to low atmospheric transmission that translates into limited contribution of the surface radiation at these frequencies. Even the 150 GHz

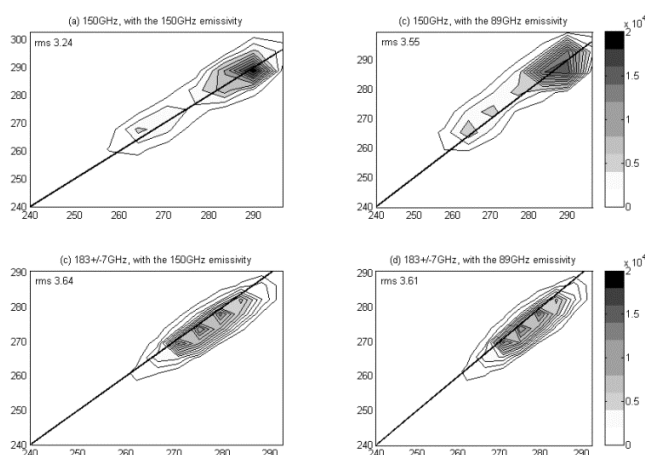


Figure 9: Density contours of the observed brightness temperature (X axis) versus the simulated brightness temperature (Y axis) over land using odd January 2000 days data for AMSU channels: (a) 150 GHz, using the 150GHz emissivity calculated using even January days, (b) 150 GHz, using the 89 GHz emissivity calculated using even January days, (c) same as (a) but for  $183\pm 7$ GHz, (d) same as (c) but for  $183\pm 7$ GHz. The RMS of errors for (observations-simulations) is added to the plots. The color bar indicates the observations number for each contour class.

channel calculations have been shown rather noisy as compared to the other window channels, due to lower atmospheric transmission.

Could the emissivities in the sounding channels be accurately estimated from the closest window channels? And therefore, could we use emissivities calculated at window channels to simulate Tbs at the closest sounding channels? Simulating the Tbs in the sounding channels using the averaged emissivities calculated in the closest window channel tests this assumption (figure 8). For example, we used the emissivity calculated at 50 GHz to simulate the Tb in the vicinity of the 50 GHz channel (i.e. 52.3 and 53.8 GHz channels) assuming that the emissivity could not change a lot from 50 to 53 GHz (see the frequency dependence of the emissivity in section III.D). In the same manner, emissivity at 150 GHz has been used to simulate Tbs at  $183.31\pm 7$  and  $183.31\pm 3$  GHz.

To evaluate the potential of using surface channels emissivities to simulate Tbs at the closest sounding channels, additional emissivity and Tbs calculations are made. The mean emissivities in the window channels are calculated using the even days in January 2000 for incidence angles lower than  $45^\circ$ . The simulated Tbs are then calculated (using (1)) for window and sounding channels for the odd days of January, using the closest (in frequency) mean emissivities estimated from the even days. That way, the errors derived from the frequency extrapolation will be compared to the natural errors observed for the corresponding frequency. Figure 8 shows the density contours of the observed Tbs for the odd days in January for 9 AMSU frequencies versus the simulated Tbs for the same

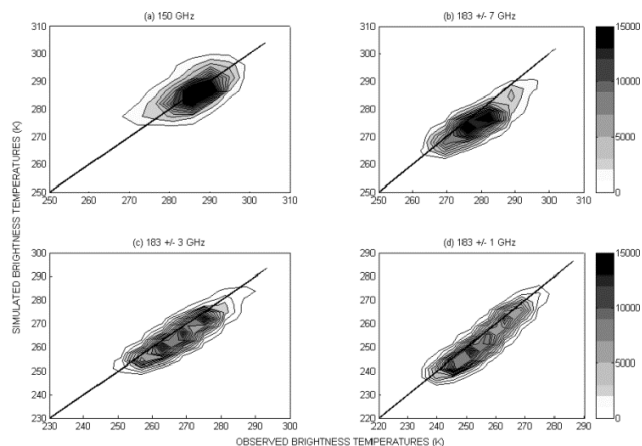


Figure 10: Density contours of the observed brightness temperature (X axis) versus the simulated brightness temperature (Y axis) over land using 15 days from August 2000 data for AMSU channels: (a) 150 GHz, using the 89GHz emissivity calculated using July data, (b) same as (a) but for  $183\pm 7$ GHz, (c) same as (a) but for  $183\pm 3$ GHz, (d) same as (a) but for  $183\pm 1$  GHz.

period using the ATM radiative transfer code, the corresponding ECMWF atmospheric profiles and ISCCP surface temperature, and the mean emissivities calculated in the window channels for the even days for the same month. Good agreements are observed between the measured and the simulated Tbs for all channels, and the agreement is particularly remarkable in the sounding channels. The Root Mean Square (RMS) of errors at window channels is less than 4 (3.44, 3.93, 2.63, 3.80, and, 3.24 at 23.8, 31.4, 50, 89 and, 150 GHz). Good results are obtained for the sounding channels: an RMS of  $\sim 2$  for channels 52 and 53 GHz, and 3.64 for the  $183\pm 7$  GHz channel.

The present results show that the emissivity calculation scheme produces quite good estimates of the AMSU Tbs. The radiative transfer model generates a very realistic estimation of the atmospheric contribution since the results for channels less sensitive to surface are also very consistent. For example the RMS of errors at AMSU channels 6, 7, 8, 9, 11, and 12 are 1.41, 1.03, 0.38, 0.45, 1.69, 0.61, and 0.71 respectively.

Given that the 150 GHz emissivity calculations are noisy compared to other surface channels; a further test is performed using the 89 GHz emissivity to simulate the Tb at 150,  $183.31\pm 7$ , and  $183.31\pm 3$  GHz. The corresponding results are given on figure 9. The RMS of errors at 150 and  $183.31\pm 7$  GHz are then 3.56 and 3.61 respectively.

Emissivity from the 150 GHz channel is noisier in a moist month like July than in January. Figure 10 compares the simulated Tb for 150,  $183.31\pm 7$ ,  $183.31\pm 3$  and,  $183.31\pm 1$  GHz channels to the observed Tbs for the 15 first days of August 2000. The simulated Tbs have been calculated using (1) and using the emissivity at 89 GHz estimated with July 2000 data. The agreement between the observed and the simulated Tbs is very good. The use of the

emissivity at 89 GHz is a good approximation for the AMSU-B channels (150,  $183.31 \pm 7$ , and  $183.31 \pm 3$  GHz). This approximation allows us to avoid noise introduced by the 150 GHz retrieved emissivity, which is particularly important in very moist conditions and high zenith angles.

## V. Conclusion

The land surface emissivities have been calculated for AMSU window channels for all scanning conditions, for six months in 2000, over Africa, Southern Europe, and the Middle East. The calculation makes use of an up-to-date radiative transfer model (ATM) and is performed for cloud-free AMSU observations. Ancillary data include the ISCCP cloud flags and surface skin temperature, along with the temperature and water vapor profiles from the ECMWF re-analysis. Emissivity maps are presented and show the realistic spatial variations with surface characteristics changes related to vegetation and the presence of open water. The day-to-day variability of the emissivities within a month is lower than 0.02 for all window channels, for low incidence angles (less than  $45^\circ$ ). The angular and spectral dependence of the AMSU emissivity is examined for various surfaces. An instrumental AMSU-A problem is evidenced related to an asymmetry in the scan angle behavior. For low incidence angles, the land surface emissivities in the sounding channels (50-60 GHz and 150-183 GHz) could successfully be extrapolated from the calculation in the closest window channels. In a following study, a parameterization of the frequency and angular dependence of the emissivities will be proposed, anchored on accurate emissivity calculations directly derived from satellite observations at 23-150 GHz frequencies and at all incidence angles. The emissivity study is essentially motivated by the need to improve low level temperature and humidity profiles retrievals over land. The use of the AMSU window emissivities to retrieve atmospheric temperature and humidity information over land using AMSU-A and B measurements has been tested by Karbou et al. [14]. The preliminary results are encouraging: the use of reliable land emissivity information helps low level temperature and humidity profiles retrievals over land (about  $2^\circ$  and 7.5% of temperature and relative humidity RMS errors near the surface, respectively). Further details and investigations about this study will be proposed soon.

The emissivity resulting datasets for AMSU window channels and over Africa, Eurasia and Eastern South America are available for use by the scientific community. Moreover, additional calculations have been conducted to enlarge the geographic area to the globe.

## ACKNOWLEDGMENT

The authors wish to thank Frederic CHEVALLIER and Fuzhong WENG for valuable discussions regarding AMSU calibration. They would like to thank Sophie CLOCHE and Jean Louis MONGE for their help to archive and process

the ERA40 and AMSU data. They also appreciate comments and suggestions provided by two anonymous reviewers. The ISCCP data have been provided by Bill ROSSOW, AMSU data via THE SATELLITE ACTIVE ARCHIVE (SAA), and ERA40 temperature-humidity profiles from ECMWF.

## REFERENCES

- J.-C. Calvet, J.-P. Wigneron, A. Chanzy, S. Raju, and L. Laguerre, "Microwave dielectric properties of a silt-loam at high frequencies," *IEEE Trans. Geosci. Remote sensing*, vol. 33, pp. 634-642, 1995.
- B.J. Choudhury, "Reflectivities of selected land surface types at 19 and 37 GHz from SSM/I observations," *Remote Sens. Environ.*, vol. 46, Issue 1, pp. 1-17, 1993.
- R.E. Dickinson, A. Henderson-Sellers, P.J. Kennedy, and M.F. Wilson, "Biosphere-atmosphere transfer scheme (BATS) for the NCAR community climate model," NCAR Technical Note NCAR/TN275+STR, Boulder, CO. 69 p, 1986.
- S. English, "Estimation of temperature and humidity profile information from microwave radiances over different surface types," *J. Appl. Meteorol.*, vol. 38, pp. 1526-1541, 1999.
- G.W. Felde, and J. D. Pickle, "Retrieval of 91 and 150 GHz Earth surface emissivities," *J. Geophys. Res.*, vol. 100, NO. D10, pp. 20,855-20,866, Oct 1995.
- L. Garand, D. S. Turner, M. Larocque, J. Bates, S. Boukabara, P. Brunel, F. Chevalier, G. Deblonde, R. Engelen, M. Hollingshead, D. Jackson, G. Jedlovec, J. Joiner, T. Kleespies, D. S. McKague, L. McMillin, J.-L. Moncet, J. R. Pardo, P. J. Rayer, E. Salathe, R. Saunders, N. A. Scott, P. Van Delst, and H. Woolf., "Radiance and Jacobian intercomparison of radiative transfer models applied to HIRS and AMSU channels," *J. Geophys. Res.*, vol. 106, 24017-24031, 2001.
- G. Goodrum, K. B. Kidwell and W. Winston, "NOAA KLM user's guide," National Oceanic and Atmospheric Administration, 2000
- N.C. Grody, J. Zhao, R. Ferraro, F. Weng, and R. Boers, "Determination of precipitable water and cloud liquid water over oceans from the NOAA-15 advanced microwave sounding unit," *J. Geophys. Res.*, vol. 106, 2943-2954, 2001.
- T.J. Hewison, "Airborne measurements of forest and agricultural land surface emissivity at millimetre wavelengths," *IEEE Trans. Geosci. Remote sensing*, vol. 39, 2, 393-400, 2001.
- \_\_\_\_\_ and S. English, "Airborne retrieval of snow and ice surface emissivity at millimetre wavelengths," *IEEE Trans. Geosci. Remote sensing*, vol. 37, 4, 1871-1879, 1999.
- \_\_\_\_\_ and R. W. Saunders, "Measurements of the AMSU-B Antenna Pattern," *IEEE Trans. Geosci. Remote sensing*, vol. 34, 2, 405-412, 1996.
- R. G. Isaacs, Y.-Q. Jin, R. D. Worsham, G. Deblonde, and V.J. Falcone, "The RADTRAN microwave surface emission models," *IEEE Trans. Geosci. Remote sensing*, vol. 27, pp. 433-440, 1989.
- A.S. Jones, and T. H. Vonder Haar, 1997, "Retrieval of microwave surface emittance over land using coincident microwave and infrared satellite measurements," *J. Geophys. Res.*, vol. 102, NO. D12, pp 13,609-13,626, Jun 1997.
- F. Karbou, F. Aires, C. Prigent, L. Eymard and J. Pardo, "Atmospheric temperature and humidity profiles over land from AMSU-A and AMSU-B data," *Microrad04*, Roma, Italy, 2004.
- C. Mazler, "Passive microwave signatures of landscapes in winter," *Meteorol. Atmos. Phys.*, vol. 54, pp. 241-260, 1994.
- \_\_\_\_\_, "Seasonal evolution of microwave radiation from an oat field," *Remote Sens. Environ.*, vol. 31, pp. 161-173, 1990.
- T. Mo, "AMSU-A Antenna Pattern corrections," *IEEE Trans. Geosci. Remote sensing*, vol. 37, 1, 103-112, 1999.
- J.C. Morland, David I. F. Grimes and T. J. Hewison, "Satellite observations of the microwave emissivity of a semi-arid land surface," *Remote Sens. Environ.*, vol. 77, Issue 2, pp. 149-164, 2001.
- \_\_\_\_\_, David I. F. Grimes, George Dugdale and Tim J. Hewison, "The Estimation of Land Surface Emissivities at 24 GHz to 157 GHz

Using Remotely Sensed Aircraft Data," *Remote Sens. Environ.*, vol. 73, Issue 3, pp. 323-336, 2000.

J.R. Pardo, J. Cernicharo and E. Serabyn, "Atmospheric Transmission at Microwave (ATM): an improved model for millimetre/submillimeter applications," *IEEE Trans. Ant and Prop.*, vol. 49, NO. 12, pp. 1683-1694, 2001.

C. Prigent, J.-Munier, G. Ruffié, and J. Roger, "Interpretation of passive microwave satellite observations over Oman and Egypt," *EGS-AGU*, Nice, 2003.

\_\_\_\_\_, J.P. Wigneron, B. Rossow and J.R. Pardo, "Frequency and angular variations of land surface microwave emissivities: can we estimate SSM/T and AMSU emissivities from SSM/I emissivities?," *IEEE trans. Geosci. Remote Sensing*, vol. 38, NO. 5, pp. 2373-2386, 2000.

\_\_\_\_\_, W.B. Rossow, and E. Matthews, "Global maps of microwave land surface emissivities: potential for land surface characterization," *Radio Sci.*, vol. 33, pp. 745-751, 1998.

\_\_\_\_\_, W.B. Rossow, and E. Matthews, "Microwave land surface emissivities estimated from SSM/I observations," *J. Geophys. Res.*, vol. 102, pp. 21 867-21 890, 1997.

W.B. Rossow and L.C. Garder, "Cloud detection using satellite measurement of infrared and visible radiances for ISCCP," *J. Clim.*, vol. 6, 2341-2369, 1993a.

\_\_\_\_\_, and L.C. Garder, "Validation of ISCCP Cloud detection," *J. Clim.*, vol. 6, 2370-2393, 1993b.

\_\_\_\_\_, and R. A. Schiffer, "ISCCP cloud data products," *Bull. Am. Meteor. Soc.*, vol. 72, pp. 2-20, 1991.

F. Weng, L. Zhao, R. Ferraro, G. Poe, X. Li, N. Grody, "Advanced Microwave Sounding Unit Cloud and Precipitation Algorithms," *Radio Sci.*, vol. 38, 8,086-8,096, 2003.

\_\_\_\_\_, B. Yan and N. Grody, "A microwave land emissivity model," *J. Geophys. Res.*, vol. 106, NO. D17, pp 20,115-20,123, 2001.

J.-P. Wigneron, D. Guyon, J.-C. Calvet, G. Courrier, and N. Bruiguiet, "Monitoring coniferous forest characteristics using a multifrequency microwave radiometry," *Remote Sens. Environ.*, vol. 60, pp. 299-310, 1997.

L. Zhao and F. Weng, "Retrieval of ice cloud parameters using the Advanced Microwave Sounding Unit (AMSU)," *J. Appl. Meteor.*, vol. 41, 384-395, 2002.

**Fatima KARBOU** received the engineering degree from the Institut Agronomique et Vétérinaire Hassan II, Rabat, Morocco, in 1999, in Topography. In September 2000 and during one year, she joined the ACRI research firm team at Sophia-Antipolis, France, as a research engineer. She worked on an air pollution simulator in both urban and rural environments and on NOAA instruments level 1 and 2 data processing tools. In autumn 2004, she will receive the Ph.D. degree from Versailles Saint Quentin en Yvelines University in physics of the environment. Her main fields of interest include the use of passive microwave instruments to estimate and analyze the land emissivities and to retrieve atmospheric parameters over land.

**Catherine PRIGENT** received the Ph.D degree in Physics from Paris University in 1988. Since 1990, she is a researcher for the Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS) in Paris Observatory. From 1995 to 2000, she was on leave from the CNRS and she worked at NASA/Goddard Institute for space Studies, Columbia University, New York, USA. She is now back at Paris Observatory. Her research interests focus on passive microwave remote sensing of the Earth. She first worked on modeling of the sea surface emissivities at microwave wavelengths and on the estimation of atmospheric parameters over ocean from microwave measurements. At present, her main interests include calculation and analysis of microwave land surface emissivities and estimation of atmospheric and surface parameters over land from microwave observations using variational and neural network methods. She is also involved in satellite remote sensing of clouds with the analysis of passive microwave observations over convective cloud structures.



**Laurence EYMARD** graduated from Ecole Normale Supérieure and Université Paris6 in 1978. She received the Ph.D. degree in physics of the atmosphere in 1985. She is now senior scientist (directeur de recherche) in CNRS, head of Laboratoire d'Océanographie Dynamique and Climatologie (CNRS/IPSL/LODYC) in Paris, Université Pierre et Marie Curie. Her Main research domains are: atmosphere dynamics (boundary layer) and hydrological cycle, ocean – atmosphere interactions, and microwave radiometry. She coordinates experimental studies of the ocean-atmosphere interactions (SEMAPHORE, CATCH/FASTEX). She is the principal investigator (PI) of the ERS/ENVISAT and Jason altimeter mission: in charge of the in-flight calibration / validation of ERS microwave radiometers. She is also PI of a new humidity sounder (SAPHIR) on the Megha/Tropique Indian – French mission project.



**Juan PARDO** Received the degree in physics from Complutense University of Madrid, Spain, in 1991 and the Ph.D. degree in astrophysics and spatial techniques from Pierre et Marie Curie University, Paris, France, in 1996. Since then, he has been a Postdoctoral Research Fellow supported by the U.S. National Science Foundation at the NASA-Goddard Institute for Space Studies, New York, and at the California Institute of Technology, Pasadena. In 2001, he joined the Consejo Superior de Investigaciones Científicas, Madrid, as a Research Associate. His main research interests are microwave and IR spectroscopy, observational techniques in submillimeter astronomy, interstellar and circumstellar media, radiative transfer in planetary atmospheres, and terrestrial and planetary remote sensing from ground and satellite platforms. He has made several contributions to these areas in the past, including the ATM model used in this work.

## CHAPITRE 5

---

### PARAMETRISATION DE L' EMISSIVITE DE SURFACE

---

Ce chapitre est basé sur : Karbou, F., (2004): A new Microwave land emissivity parametrization, TGRS-00430-2004, *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, (soumis)

|          |  |           |
|----------|--|-----------|
| <b>5</b> | <b>PARAMETRISATION DE L' EMISSIVITE DE SURFACE</b> | <b>60</b> |
| 5.1.     | INTRODUCTION                                       | 60        |
| 5.2.     | PUBLICATION ASSOCIEE AU CHAPITRE                   | 62        |

---

## 5 PARAMETRISATION DE L' EMISSIVITE DE SURFACE

---

### 5.1. INTRODUCTION

Les unités de sondage AMSU-A et –B à bord des dernières générations de satellites polaires de la NOAA, offrent des possibilités uniques pour décrire la distribution verticale de la température et de l'humidité atmosphériques ainsi que la possibilité de restituer de l'information sur l'état de la surface. En plus de canaux capables de sonder la température et l'humidité atmosphériques, les deux instruments fournissent des mesures à partir des canaux surface (23.8, 31.4, 50.3, 89, et 150 GHz) principalement sensibles à la surface et aux basses couches atmosphériques. Au dessus des surfaces continentales, l'émissivité de surface constitue un paramètre clé pour pleinement exploiter les mesures AMSU au-dessus des continents. Avec une bonne connaissance de l'émissivité de surface, le potentiel de sondage de la température et de l'humidité atmosphériques au-dessus des continents a été démontré (*Karbou et al. 2004*, JGR-A). Aujourd'hui, la plupart des observations micro onde disponibles sont plus intensivement utilisées sur océan dans les modèles de prévision numérique du temps qu'au-dessus des continents.

Ce travail est motivé par le besoin d'utiliser les mesures globales issues des instruments AMSU ou d'instruments similaires, au-dessus des surfaces continentales pour extraire de l'information sur les basses couches atmosphériques et sur l'état de la surface. L'utilisation directe des émissivités AMSU déjà calculées (*Karbou et al. 2004*, TGRS) est possible pour de telles applications; cependant, pour pouvoir utiliser toutes les observations disponibles, la dépendance angulaire de l'émissivité de surface doit être prise en compte. Il est difficile de

produire des cartes d'émissivités moyennes à tous les angles zénithaux d'observations. Le mode de balayage des instruments AMSU, a pour conséquence de limiter le nombre d'observations pour chaque classe d'angles d'observation. Notons que les émissivités AMSU ont été calculées sur la base des données de l'année 2000 pendant laquelle seulement le satellite NOAA 15 était opérationnel, ce qui limite davantage la base de données des émissivités.

Le but principal de ce travail est de proposer une paramétrisation simple et fiable de l'émissivité de surface basée sur les calculs directs de l'émissivité de surface AMSU et applicable sur une gamme de fréquences allant de 23 à 150 GHz et pour des angles d'observations variant de  $-58^\circ$  à  $+58^\circ$  par rapport au nadir. L'établissement d'une telle paramétrisation de l'émissivité de surface pourrait aider la communauté scientifique d'assimilation de données satellitaires pour assimiler des observations provenant des instruments AMSU au-dessus des surfaces continentales. La paramétrisation proposée pourrait être également utilisée pour traiter des données au-dessus des terres issues d'un instrument similaires aux instruments AMSU (fréquence, polarisation et les angles d'observations).

L'étude détaillée de la paramétrisation de l'émissivité de surface aux fréquences micro-onde est présentée dans la publication jointe à ce chapitre. Les coefficients de la paramétrisation sont fournis dans l'annexe 2 à la fin du manuscrit.

## 5.2.PUBLICATION ASSOCIEE AU CHAPITRE

Karbou, F., (2004): A new Microwave land emissivity parameterization, TGRS-00430-2004, *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, (soumis)

Article soumis le 30 Septembre 2004



## **A NEW MICROWAVE LAND EMISSIVITY PARAMETRIZATION**

**Fatima KARBOU**

CETP, 10-12, Avenue de l'Europe

78140, Vélizy, France

Email: [fatima.karbou@cetp.ipsl.fr](mailto:fatima.karbou@cetp.ipsl.fr)

Tel.: +33 1 39 25 39 28

Fax: +33 1 39 25 47 78

September 30<sup>th</sup>, 2004

TGRS-00430-2004

Submitted to: *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*

***Abstract***— The exploitation of microwave satellite sounder measurements near window channels is more performed over oceans than over land surfaces. Indeed, the exploitation of these data over land requires a good knowledge of the surface emissivity together with the skin temperature. In this work, a new microwave emissivity parameterization is proposed to estimate the land emissivity at AMSU frequencies and scanning conditions. The parameterization takes into account different surface types from bare soil to areas with high vegetation density. The emissivity parameterization is based on recent AMSU emissivity calculations and provides emissivity estimates for frequencies ranging from 23 to 150 GHz and for AMSU polarization conditions. February 2000 data have been used to build the emissivity parameterization. For the emissivity simulations, two approaches have been tested: (1) a simplified approach using only the emissivity parameterization as a function of the vegetation type, the frequency, and the AMSU scan position, and (2) a complementary approach based on the simplified one with the addition of a unique mean emissivity map at nadir and at 23.8 GHz derived from July 2000. The emissivity simulations have been evaluated for both approaches by looking at their differences with the previously calculated emissivities (directly from satellite observations). The parameterization results are very encouraging: less than 1% of emissivity bias (between the calculated and simulated emissivities) using the second approach. The emissivity parameterization has been further evaluated over several months of data and a large geographic area by comparing the observed and simulated Tbs over land.

***Index Terms***— AMSU, microwave surface emissivity, parameterization

## I. INTRODUCTION

The Advanced Microwave Sounding Units (AMSU) A and B, on board the latest generation of the National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) polar orbiting satellites, offer unique capabilities to globally monitor the atmospheric temperature and humidity distributions. AMSU instruments could also provide surface information. Indeed, AMSU-A benefits from channels near the 50-60 GHz oxygen absorption band and is able to retrieve atmospheric temperature profiles from about 45 km down to the Earth's surface. AMSU-B channels located in the vicinity of the strong water vapor absorption line at 183.31 GHz measure the thermal emission of water vapor arising from different atmospheric layers and enable atmospheric moisture profiling. In addition, the two instruments provide measurements from window channels (23.8, 31.4, 50.3, 89, and 150 GHz) mainly sensitive to surface and low atmospheric effects. The land surface emissivity constitutes a key parameter for successful atmospheric and surface retrievals over land from AMSU and other microwave measurements over land. With a good knowledge of the land emissivity together with the skin temperature, the potential of AMSU-A and -B measurements for atmospheric temperature and humidity profiling over land has been demonstrated [14]. Today, most of the available microwave observations are more intensively used over ocean in operational Numerical Weather Prediction (NWP) models than over land. The land surface emissivity is high and depends upon the surface type, composition, roughness and moisture among other parameters. Furthermore, the emissivity depends upon observation characteristics such as the instrument frequency, polarization, ground resolution, and the observation angle.

Ground based land emissivity estimation ([1], [15], [16], and [28]) and aircraft emissivity measurements ([8], [9]) have been performed. However, it is not obvious to extrapolate them to surfaces at larger scales. Moreover, land emissivity estimation using microwave satellite observations have been performed from regional ([2], [4], [12], [18], and [19] among others) to global scales ([13], [21], and [22], [23]). These studies were based on different microwave instruments and enable understanding the emissive properties of the Earth at different frequencies, polarization, and ground resolutions. In addition, various emissivity model developments have been conducted (for instance [11] and [26]); however and especially for global applications, these models need accurate and hardly available surface input parameters (vegetation characteristics, soil moisture, and roughness among others) to reliably describe the Earth emissivity.

This work is motivated by the need to use globally available microwave measurements, and especially AMSU data, over land to extract the low level atmosphere and surface information. The direct use of already calculated

AMSU emissivities is possible for such applications; however one should account for the angular variation of AMSU emissivities, particularly high over bare soil areas. However, it is difficult to produce mean emissivity maps at all zenith angles. In addition, the cross-track scanning pattern of the AMSU instrument provides measurements at angles between  $\pm 58^\circ$ . Consequently, compared to conical instruments, the observations number per scan position is limited. The main goal of this research is to propose a simple and reliable microwave land emissivity parameterization based on recent emissivity calculations at AMSU surface frequencies and scanning conditions [13] and applicable to AMSU and similar satellite instrument data. The establishment of such reliable microwave land emissivity parameterization could help the satellite data assimilation community to assimilate AMSU observations over land. The proposed parameterization could be utilized to process data from an AMSU like instrument (frequency, polarization and scanning conditions) over land.

The present study proposes a new parameterization of the land emissivity for frequencies ranging from 23 to 150 GHz based on previously estimated AMSU land emissivities. The AMSU observations and emissivity datasets are described in section II. The microwave emissivity parameterization is presented in section III. Two complementary approaches of this parameterization are discussed in this section and their results are evaluated over 5 months of data in section IV. Section V concludes this study.

## II. AMSU AND EMISSIVITY DATASETS

### A. AMSU DATA

The AMSU sounding unit contains two modules A and B. AMSU-A has 12 channels (52.8 to 58 GHz) in the oxygen absorption band and contains also surface channels at 23.8, 31.4, 50.3 and 89 GHz. AMSU-B is humidity sounder and has two window channels at 89 and 150 GHz and three other channels centered on the 183.31 GHz water vapor line. AMSU A and B have a nominal field of view of  $3.3^\circ$  and  $1.1^\circ$  at nadir and sample 30 and 90 Earth views respectively. Thereby, the AMSU observation zenith angle could reach  $\pm 58^\circ$ . Channel characteristics for both AMSU-A and AMSU-B radiometers are given in Table I and detailed description of the AMSU sounders is reported in [5].

In the present study, the level 1b AMSU data from January to August 2000 have been obtained from the Satellite Active Archive (SAA) and processed using the Advanced ATOVS Processing Package (AAPP) created and distributed by EUMETSAT and other partners. For the present analysis, we focus on a large geographic area

(from 60°W to 60°E in longitude and from 60°S to 60°N in latitude) to include wide ranges of surface conditions. The AMSU radiances were corrected from the AMSU antenna effect ([10], [17]).

Compared to infrared sounding measurements, AMSU observations are less sensitive to high thin and non precipitating clouds. However, for an optimum accuracy of the emissivity estimates, only cloud free data have been selected to conduct both emissivity calculations and simulations. The cloud screening is conducted using the International Satellite Cloud Climatology Project (ISCCP) DX datasets. Cloud parameters and skin temperatures are extracted from ISCCP every 30 km and 3 hours. In the ISCCP processing, information about clouds is obtained from visible and infrared measurements from polar and geostationary satellites, using radiative analysis [25].

### B. AMSU LAND EMISSIVITY

The AMSU land surface emissivities have been estimated using data from 2000, for 30 observation zenith angle ranges (from -58° to +58°) and for the 23.8, 31.4, 50.3, 89, and 150 GHz channels[13]. Collocated visible/infrared satellite measurements from ISCCP data have been used to screen for cloud and rain effects and to provide an accurate estimate of the skin temperature. The nearby temperature-humidity profiles from ECMWF forty year re-analyses (ERA-40) [30] have been used as input to a state-of-the-art microwave radiative transfer model [20] in order to estimate the atmospheric contribution to the measured radiances. The AMSU emissivities have been estimated under the assumption of a flat and specular surface, for frequencies ranging from 23.8 to 150 GHz, from -58° to +58° zenith angle and for the AMSU polarization. Because of the rotating AMSU antenna, the estimated emissivity is a mixture between emissivities in the vertical and the horizontal polarizations. The AMSU emissivity at scan angle  $\theta_z$  could be written as follow:

$$\varepsilon(\theta_z) = \varepsilon_p(\theta_z) \times \cos^2(\theta_s) + \varepsilon_q(\theta_z) \times \sin^2(\theta_s) \quad (1)$$

Where:

$\varepsilon_p(\theta_z)$  and  $\varepsilon_q(\theta_z)$  are the two orthogonal polarized surface emissivities at  $\theta_z$  local zenith angle. For AMSU surface channels, the polarization is vertical near nadir and thereby,  $\varepsilon_p$  is equal to  $\varepsilon_v$  and  $\varepsilon_q$  is equal to  $\varepsilon_h$ .

The emissivities have been evaluated by analyzing their dependencies with surface types, the observation angle, and frequency [13]. The Biosphere-Atmosphere Transfer Scheme (BATS) vegetation land cover data set (available at 30x30 km grid resolution) has been used for vegetation classification ([3]). The obtained emissivities have been successfully compared to SSM/I emissivities calculated by Prigent et al. [24].

Monthly mean emissivity maps at window channels have been generated. These maps exhibit the natural changes of the emissivity mainly related to changes in surface types. For example, lakes and rivers as well as the coastlines are associated with low emissivities at all frequencies but also with high emissivity horizontal variability. For the entire datasets, the day-to-day emissivity standard deviations are generally less than 2% for AMSU surface channels and tend to increase with frequency and zenith angles.

The angular dependence of the estimated AMSU emissivities is found to be important over bare soil areas and limited over dense vegetation areas. Figure 1 illustrates the AMSU emissivity angular variation by presenting the monthly mean emissivities at 23.8, 31.4, 50.3, and 89 GHz calculated using 6 months of data, and over both desert and dense vegetation areas. The figure shows also that the emissivity curves with respect to the scan position have similar trend over 6 different months of data. Further analyses including other vegetation types confirm it. For a specific vegetation cover, the emissivity variation shows a remarkable stable pattern with the scan position (indirectly with the observation zenith angle). If one ignores the seasonal variations of the emissivity, the stable pattern of the emissivity curves with scan position for available vegetation types could help derive a microwave land emissivity parameterization based on the pre-calculated AMSU emissivities. In addition, a scan asymmetry bias has been highlighted by analyzing the AMSU angular dependency. The scan asymmetry (difference between the emissivities at scan position 1 and 30) also noticed by Weng et al. [26], is likely related to an instrument calibration problem and is found to be higher at 31.4 GHz (3%) and at 23.8 GHz (2.4 %) over bare soil areas and less important for the 50 and 89 GHz channels.

### III. AN EMISSIVITY PARAMETERISATION DERIVED FROM AMSU MEASUREMENTS

#### A. A simplified approach

Monthly mean emissivity curves sorted by scan positions and by vegetation types show stable patterns over six months of data. This characteristic is used to derive a simple and reliable parameterization of the microwave emissivity as a function of the frequency, vegetation cover and AMSU scan position. To build the emissivity parameterization, emissivity estimates from February 2000 are taken and emissivity polynomial fit functions are derived for the available vegetation types with respect to the scan position using the whole month data.

For each surface vegetation type, polynomial fit coefficients have been tested to correctly describe the emissivity variation with the scan position. The coefficients of a polynomial of degree 5 are found appropriate to fit the emissivity data. The emissivity function could then be expressed as follow:

$$\mathcal{E}_{(\vartheta, FOV)} = F_{1,\vartheta} \times (FOV - 15)^5 + F_{2,\vartheta} \times (FOV - 15)^4 + F_{3,\vartheta} \times (FOV - 15)^3 + F_{4,\vartheta} \times (FOV - 15)^2 + F_{5,\vartheta} \times (FOV - 15)^1 + F_{6,\vartheta} \quad (2)$$

Where,

$\mathcal{E}_{(\vartheta, FOV)}$  is the emissivity at frequency  $\nu$  and scan position FOV. Notice that when FOV=15 or FOV=16 then the observation is at nadir. The AMSU-A scan position varies from 1 to 30 (the corresponding zenith angle varies from  $\pm 58^\circ$ ).

$F_{1,\nu}$ ,  $F_{2,\nu}$ ,  $F_{3,\nu}$ ,  $F_{4,\nu}$ ,  $F_{5,\nu}$  and  $F_{6,\nu}$  are the polynomial fit coefficients at the frequencies 23.8, 31.4, 50.3, 89 and 150 GHz and could be found at the web address : [www.cetp.ipsl.fr/~karbou/](http://www.cetp.ipsl.fr/~karbou/). The coefficients are calculated for each vegetation type when sufficient number of emissivity estimates is available. Figure 3 shows the obtained fitted emissivity curves for dry (vegetation cover 8 and 11) and vegetated (vegetation cover 7 and 19) areas with respect to the AMSU-A scan position using the parameterization coefficients proposed earlier. The emissivity fitted functions constitute the proposed emissivity parameterization and take into account the vegetation cover, the frequency, and the observation zenith angle.

For a given AMSU observation, the procedure to simulate the corresponding land emissivity could be done using the following approach (called simplified approach):

- (a) The geographic location of the AMSU observation (latitude/longitude) is used to determine the vegetation type.
- (b) Depending on the observation frequency, the appropriated emissivity function is selected and then the emissivity is estimated using (2) at the given observation scan position.

This approach has been tested on data from August 2000 and the obtained emissivity results at 31.4 GHz are presented on figure 3. Figure 3.a shows the mean monthly emissivities at 31.4 GHz directly calculated from satellite observations (from [13]) whereas figure 3.b shows the mean bias between the calculated and the simulated emissivities using the parameterization approach described earlier. All AMSU-A zenith angles were used for the emissivity simulations.

Lakes and rivers show larger bias (see for instance the Congo and Nile rivers) as well as the coastlines. Some locations in the Arabian plate and in North Africa show also high biases. Most of this region is defined as desert area in our vegetation climatology and therefore have a unique function to calculate the emissivity. It is clear that within this region we need a more detailed vegetation cover specification to correctly account for the natural

variation of the emissivity. For more vegetated areas, the present parameterization approach seems to provide good simulations. In addition, similar geographic patterns could be observed while comparing the monthly mean emissivities and biases (figure 3.a and 3.b). For example, in the desert, two particular areas of very low emissivities could be observed, one in the South of Arabia (Western Oman, Eastern Yemen) and another one in Egypt. No final conclusion exists yet to explain these microwave signatures; however, they are likely related to geological structures [21]. These regions show also the highest emissivity biases.

The simplified emissivity parameterization is a compromise to process data over land. However, this approach has many limitations: first, it does not account for open water (rivers, lakes, coastlines) and relief areas. Second, the intrinsic variability of a specific vegetation cover is also neglected; the desert for example has to be more precisely described in order to account for it in the emissivity parameterization. Finally, the seasonal variation of the emissivity is not accounted for. The comparison of mean emissivity maps at different frequencies during 2000 shows stable emissivity signatures emanating from different geographic locations (lakes, rivers, as well as other locations). This propriety could be exploited to enhance the surface characteristics description by using a unique mean emissivity map.

### *B. A complementary approach*

In order to have additive surface description details, we develop a second parameterization approach (called complementary approach) based on the emissivity fitted functions described earlier but also on a mean emissivity map from July 2000 generated using observations near nadir and at 23.8 GHz. To limit the rain-induced soil moisture impact on the emissivity, a summer month is chosen for the mean emissivity map rather than February data. However, even for July data, the potential of cloud contamination is likely and also rain-induced soil moisture variation especially over the subsahelian transition zone in Africa. The new parameterization is based on the simplified one with the addition of a unique mean emissivity map at nadir and at 23.8 GHz. The new approach uses also coefficient  $F_{i,\nu}$  where  $\nu$  is the frequency and  $i$  varies from 1 to 6. One could notice that within the emissivity parameterization,  $F_{6,\nu}$  coefficient represents the nadir emissivity for frequency  $\nu$ .

The procedure to simulate the emissivities using the complementary approach is:

- (a) To determine the vegetation type of an observation using its latitude and longitude.
- (b) Then using the geographic location and based on the unique mean emissivity map at 23.8 GHz, we dynamically determine the new coefficient  $F'_{6,23.8}$  as the mean emissivity at 23.8 GHz and at nadir.
- (c) The other new coefficients  $F'_{6,\nu}$  with  $\nu$  varying from 31.4 to 150 GHz could be calculated using the formula:



$$F'_{6,\theta} = F'_{6,23.8} + F_{6,\theta} - F_{6,23.8} \quad (3)$$

Where  $F_{6,\theta}$  are the original parameterization coefficients and  $F'_{6,\theta}$  are the updated coefficients. The new coefficients  $F'_{6,\theta}$  will replace the older ones  $F_{6,\theta}$  in the emissivity parameterization.

- (d) Once the coefficients  $F'_{6,\theta}$  are updated, we use them to calculate the emissivity at the observation scan position using (2) by selecting the appropriate emissivity fitted function (with regard to the vegetation type and frequency).

Emissivity simulation results using the complementary approach are given on figure (3.c). Contrary to the simplified approach, the second one seems more successful to account for the natural variation of the emissivity within the large study area. The emissivity biases between the retrieved and the simulated emissivities using the second approach are within 1% in most regions and for all zenith angles. Even lakes and rivers are now characterized by low emissivity biases.

In the following, we will evaluate our emissivity parameterization by direct comparison of the observed and simulated brightness temperatures (Tbs) using radiative transfer model simulations. Both approaches (simplified and complementary) will be tested through Tbs comparison.

#### IV. EVALUATION OF THE EMISSIVITY PARAMETERIZATION

In order to evaluate the proposed microwave emissivity parameterization, we perform radiative transfer calculations in cloud free conditions and using 5 months of data (January, March, April, July (except data from 23.8 GHz channel) and August 2000). The collocated ECMWF temperature and humidity profiles during this period have been used as inputs to radiative transfer model [20] to calculate the cloud-free atmospheric contribution to the measured radiances. ISCCP datasets have been used to identify clear situations and to provide skin temperature estimates. The computations are done at all AMSU-A scan positions and at the frequencies 23.8, 31.4, 50.3, and 89GHz. For given vegetation type, the simulated brightness temperatures are then calculated using:

$$Tb_{(\theta,FOV)} = (T_{skin} \times \epsilon_{(\theta,FOV)} \times \Gamma) + (T_{(\theta,\downarrow)} \times (1 - \epsilon_{(\theta,FOV)}) \times \Gamma) + T_{(\theta,\uparrow)} \quad (4)$$

$$\Gamma = \exp(-\tau_{(0,H)} / \cos(\theta_z)) \quad (5)$$

Where:

$Tb_{(\nu,FOV)}$  is the simulated brightness temperature at frequency  $\nu$  and at scan position FOV,  $T_s$  is the ISCCP skin temperature,  $T(\nu,\uparrow)$ ,  $T(\nu,\downarrow)$ , and  $\Gamma$ , are the upwelling, the downwelling brightness temperatures, and the net atmospheric transmissivity respectively, calculated for the given atmospheric profiles, path zenith angle, and the frequency  $\nu$ .

Moreover,  $\epsilon_{(\nu,FOV)}$  is the modeled emissivity for the considered vegetation class, frequency  $\nu$  and for AMSU scan position FOV. For comparison purposes we use the simplified and complementary approaches (see section III) for the emissivity simulation and we compare the corresponding simulated Tbs using both approaches with the observed AMSU Tbs.

The comparisons between the observed and the simulated Tbs are shown on figure 4 for January, April, and July 2000. Figure (4.a) presents the observed mean Tbs from January at 23 GHz whereas figures (4.b) and (4.c) show the simulated mean Tbs from the same month and at 23 GHz using the simplified and the complementary parameterization approaches respectively. Over bare soil areas, the agreement is best between the observed and the simulated Tbs using the complementary parameterization approach. This effect confirmed by the Tbs difference (observations-simulations) histograms calculated using August 2000 data at 23.8 for both desert and forest areas (Figure 5.a, 5.b, 5.c and 5.d respectively). The histograms are established for low zenith angles (angles  $\leq 20^\circ$ ) and for high zenith angles (angles  $> 45^\circ$ ). The Tbs simulations have been calculated using (1) a constant emissivity value (0.95), (2) emissivities simulated using the simplified approach, and (3) emissivities simulated using the complementary approach. Over all surfaces, the Tbs bias is found higher when using an emissivity constant value or the emissivity simplified approach. The complementary approach gives good results in all cases especially over bare soil areas where the two other emissivity approaches failed. It is important to notice that an accurate estimate of the skin temperature is necessary but not sufficient for reliable Tbs simulations. Indeed, the three Tbs simulation experiments involved the same skin temperature and different emissivity estimations, show that a reliable estimate of the emissivity is important to correctly estimate the surface contribution to the measured radiances.

Furthermore, the use of unique emissivity map at nadir and at 23.8 GHz allows better description of the emissivity variation and therefore more accurate Tbs simulations by comparison to the simplified approach results. This effect is observed over the Arabian plateau and in some locations in North Africa. However, over Eastern Europe, where rain and/or snow contamination is likely during January, we can notice a less precise agreement between both parameterization approaches and the observations. Actually, the parameterization does not account for rain induced soil moisture effects and therefore with a likely rain contamination, the emissivity parameterization overestimates the emissivity leading to an increase in the simulated brightness temperature.

Moreover, the temporal variation of the emissivity from a month to another is not accounted for also thus leading for additional emissivity estimation errors.

Similar comments can be made while looking at results from April 2000 at 50.3 GHz on figures (4.d), (4.e), and (4.f) and results from July 2000 at 89 GHz ((4.g), (4.h), and (4.i)). For 5 months of data, the agreement between observed and simulated Tbs is found better for the frequencies 23, 31, and 50 GHz than for 89 and 150 GHz. The last two channels are affected by both surface and low atmosphere errors. The emissivity parameterization using the complementary approach produces Tbs simulations in good agreement with the AMSU observed ones at all AMSU zenith angles and for different months; these results are observed even over open water and bare soil areas. Further analysis is provided in figure 6 with Tbs Root Mean Square (RMS) of errors maps calculated for window channels using the difference between the observed Tbs and the simulated Tbs for August data. The Tbs simulations are performed using both emissivity parameterizations. RMS Tbs maps illustrate the good agreement between the observed Tbs and the simulated ones using the complementary approach for all window channels especially at 50 GHz with less than 3 K of RMS of errors for the entire study area. There are still areas with high Tbs RMS mainly costliness where navigation errors are likely and relief areas. However, in all cases the Tbs RMS is improved with the parameterization complementary approach.

The proposed emissivity parameterization (the complementary approach) could be a compromise to process data over land in a simple manner. However, (1) rain induced soil moisture effects and snow phenomena are not accounted for (it is difficult to have a precise description of the rain occurrences at global scales) and (2) all seasonal variations of the emissivity due to vegetation cover developments are ignored. Furthermore, and even with these limitations, the emissivity parameterization gives very encouraging results when applied on large geographic areas and during 5 months of data. This approach could be optimized if the seasonal variation of the emissivity is taken into account by establishing an emissivity parameterization for each season. For example, one could use February data for winter emissivity parameterization and July data for summer one along with corresponding emissivity maps.

## SUMMARY AND CONCLUSIONS

A new parameterization of the land emissivity for frequencies ranging from 23 to 150 GHz is proposed. The emissivity parameterization is based on recent AMSU land emissivity calculations using February 2000 data and has been evaluated by looking at the emissivity differences between the calculated emissivities (directly from satellite observations) and the modelled ones using the parameterization. For the emissivity simulations, two approaches have been tested: (1) a simplified approach using only the emissivity parameterization as a function of

the vegetation type, the frequency, and the AMSU scan position, and (2) a complementary approach with the addition of unique mean emissivity map at nadir and at 23.8 GHz. The second approach is found to be more accurate than the first one and produces emissivity biases (between the calculated and simulated emissivities) for a large geographic area (from 60W to 60E and 60S to 60N) within 1%. The emissivity comparison results are better at low frequencies (23-50 GHz) than at 89 and 150 GHz. The emissivity parameterization has been further evaluated by looking at the observed and simulated Tbs using the two parameterization approaches during 5 months of data. Good results are obtained while comparing the Tbs from observations and model at all zenith angles even over bare soil and permanent open water areas. The proposed parameterization could be utilized to process data from an AMSU like instrument (polarization and scanning conditions) and is an adequate method to process data over most studied areas.

However, there are still some limitations to the parameterization approach for global applications: (1) as the parameterization is based on February data, the emissivity seasonal variation effect should be accounted for as well rain/snow effects. Moreover, (2) the proposed parameterization is based on AMSU data; and therefore is instrument dependent.

Different solutions to optimize the present emissivity parameterization are possible. The use of different time periods to build the emissivity parameterization could be helpful to better account for the seasonal variability of the emissivity. In addition, the use of the AMSU based emissivity parameterization to process data from other microwave instruments such as AMSU from other satellites platform like NOAA16-17 and AQUA and such as SSM/T2 instrument on board the Defense Meteorological Satellite Program (DMSP) could be investigated.

#### ACKNOWLEDGMENT

The author is very grateful to C. Prigent and L. Eymard for helpful discussions and suggestions about the manuscript and for revising the text. The ISCCP data have been provided by Bill ROSSOW, AMSU DATA VIA THE SAA AND ERA40 FROM ECMWF.

## REFERENCES

- J.-C. Calvet, J.-P. Wigneron, A. Chanzy, S. Raju, and L. Laguerre, "Microwave dielectric properties of a silt-loam at high frequencies," *IEEE Trans. Geosci. Remote sensing*, vol. 33, pp. 634-642, 1995.
- B.J. Choudhury, "Reflectivities of selected land surface types at 19 and 37 GHz from SSM/I observations," *Remote Sens. Environ.*, vol. 46, Issue 1, pp. 1-17, 1993.
- R.E. Dickinson, A. Henderson-Sellers, P.J. Kennedy, and M.F. Wilson, "Biosphere-atmosphere transfer scheme (BATS) for the NCAR community climate model," NCAR Technical Note NCAR/TN275+STR, Boulder, CO. 69 p, 1986.
- G.W. Felde, and J. D. Pickle, "Retrieval of 91 and 150 GHz Earth surface emissivities," *J. Geophys. Res.*, vol. 100, NO. D10, pp 20,855-20,866, Oct 1995.
- G. Goodrum, K. B. Kidwell and W. Winston, "NOAA KLM user's guide," National Oceanic and Atmospheric Administration, 2000
- N.C. Grody, J. Zhao, R. Ferraro, F. Weng, and R. Boers, "Determination of precipitable water and cloud liquid water over oceans from the NOAA-15 advanced microwave sounding unit," *J. Geophys. Res.*, vol. 106, 2943-2954, 2001.
- Grody, N. C., Surface identification using satellite microwave radiometers, *IEEE Trans. On Geoscience and Remote sensing*, 26, 850-859, 1988.
- T.J. Hewison, "Airborne measurements of forest and agricultural land surface emissivity at millimetre wavelengths," *IEEE Trans. Geosci. Remote sensing*, vol. 39, 2, 393-400, 2001.
- \_\_\_\_\_ and S. English, "Airborne retrieval of snow and ice surface emissivity at millimetre wavelengths," *IEEE Trans. Geosci. Remote sensing*, vol. 37, 4, 1871-1879, 1999.
- \_\_\_\_\_ and R. W. Saunders, "Measurements of the AMSU-B Antenna Pattern," *IEEE Trans. Geosci. Remote sensing*, vol. 34, 2, 405-412, 1996.
- R. G. Isaacs, Y.-Q. Jin, R. D. Worsham, G. Deblonde, and V.J. Falcone, "The RADTRAN microwave surface emission models," *IEEE Trans. Geosci. Remote sensing*, vol. 27, pp. 433-440, 1989.
- A.S. Jones, and T. H. Vonder Haar, 1997, "Retrieval of microwave surface emittance over land using coincident microwave and infrared satellite measurements," *J. Geophys. Res.*, vol. 102, NO. D12, pp 13,609-13,626, Jun 1997.
- F. Karbou, C. Prigent, L. Eymard, and J. Pardo, 2004, Microwave land emissivity calculations using AMSU-A and AMSU-B measurements, *IEEE Trans on Geoscience and Remote sensing*, TGRS-00185-2004, To be published.
- F. Karbou, F. Aires, C. Prigent, and L. Eymard, 2004, Potential of AMSU-A and -B measurements for atmospheric temperature and humidity profiling over land, *J. Geophys. Res.*, 2004JD005318, under review.
- C. Mazler, "Passive microwave signatures of landscapes in winter," *Meteorol. Atmos. Phys.*, vol. 54, pp. 241-260, 1994.
- \_\_\_\_\_, "Seasonal evolution of microwave radiation from an oat field," *Remote Sens. Environ.*, vol. 31, pp. 161-173, 1990.

- T. Mo, "AMSU-A Antenna Pattern corrections," *IEEE Trans. Geosci. Remote sensing*, vol. 37, 1, 103-112, 1999.
- J.C. Morland, David I. F. Grimes and T. J. Hewison, "Satellite observations of the microwave emissivity of a semi-arid land surface," *Remote Sens. Environ.*, vol. 77, Issue 2, pp. 149-164, 2001.
- \_\_\_\_\_, David I. F. Grimes, George Dugdale and Tim J. Hewison, "The Estimation of Land Surface Emissivities at 24 GHz to 157 GHz Using Remotely Sensed Aircraft Data," *Remote Sens. Environ.*, vol. 73, Issue 3, pp. 323-336, 2000.
- J.R. Pardo, J. Cernicharo and E. Serabyn, "Atmospheric Transmission at Microwave (ATM): an improved model for millimetre/submillimeter applications," *IEEE Trans. Ant and Prop*, vol. 49, NO. 12, pp. 1683-1694, 2001.
- C. Prigent, J.-Munier, G. Ruffié, and J. Roger, "Interpretation of passive microwave satellite observations over Oman and Egypt," *EGS-AGU*, Nice, 2003.
- \_\_\_\_\_, J.P. Wigneron, B. Rossow and J.R. Pardo, "Frequency and angular variations of land surface microwave emissivities: can we estimate SSM/T and AMSU emissivities from SSM/I emissivities?," *IEEE trans. Geosci. Remote Sensing*, vol. 38, NO. 5, pp. 2373-2386, 2000.
- \_\_\_\_\_, W.B. Rossow, and E. Matthews, "Global maps of microwave land surface emissivities: potential for land surface characterization," *Radio Sci.*, vol. 33, pp. 745-751, 1998.
- \_\_\_\_\_, W.B. Rossow, and E. Matthews, "Microwave land surface emissivities estimated from SSM/I observations," *J. Geophys. Res.*, vol. 102, pp. 21 867-21 890, 1997.
- W.B. Rossow and R. A. Schiffer, "ISCCP cloud data products," *Bull. Am. Meteor. Soc.*, vol. 72, pp. 2-20, 1991.
- F. Weng, L. Zhao, R. Ferraro, G. Poe, X. Li, N. Grody, "Advanced Microwave Sounding Unit Cloud and Precipitation Algorithms," *Radio Sci.*, vol. 38, 8.086-8.096, 2003.
- \_\_\_\_\_, B. Yan and N. Grody, "A microwave land emissivity model," *J. Geophys. Res.*, vol. 106, NO. D17, pp 20,115-20,123, 2001.
- J.-P. Wigneron, D. Guyon, J.-C. Calvet, G. Courier, and N. Bruignier, "Monitoring coniferous forest characteristics using a multifrequency microwave radiometry," *Remote Sens. Environ.*, vol. 60, pp. 299-310, 1997.
- L. Zhao and F. Weng, "Retrieval of ice cloud parameters using the Advanced Microwave Sounding Unit (AMSU)," *J. Appl. Meteor.*, vol. 41, 384-395, 2002.
- Simmons, A. J., and J.K. Gibson, the European Centre for Medium-Range Weather Forecasts: The ERA-40 Project Plan, 2000

TABLE I  
AMSU-A/B CHANNEL CHARACTERISTICS

| Channel No | Frequency (GHz)                     | Noise equivalent<br>(K) | Resolution at nadir<br>(km) |
|------------|-------------------------------------|-------------------------|-----------------------------|
| AMSU-A     |                                     |                         |                             |
| 1          | 23.8                                | 0.20                    | 48                          |
| 2          | 31.4                                | 0.27                    | 48                          |
| 3          | 50.3                                | 0.22                    | 48                          |
| 4          | 52.8                                | 0.15                    | 48                          |
| 5          | 53.596+/-0.115                      | 0.15                    | 48                          |
| 6          | 54.4                                | 0.13                    | 48                          |
| 7          | 54.9                                | 0.14                    | 48                          |
| 8          | 55.5                                | 0.14                    | 48                          |
| 9          | 57.290=f <sub>0</sub>               | 0.20                    | 48                          |
| 10         | f <sub>0</sub> +/- 0.217            | 0.22                    | 48                          |
| 11         | f <sub>0</sub> +/- 0.322 +/- 0.048  | 0.24                    | 48                          |
| 12         | f <sub>0</sub> +/- 0.322 +/- 0.022  | 0.35                    | 48                          |
| 13         | f <sub>0</sub> +/- 0.322 +/- 0.010  | 0.47                    | 48                          |
| 14         | f <sub>0</sub> +/- 0.322 +/- 0.0045 | 0.78                    | 48                          |
| 15         |                                     | 0.11                    | 48                          |
| AMSU-B     |                                     |                         |                             |
| 16         | 89                                  | 0.37                    | 16                          |
| 17         | 150                                 | 0.84                    | 16                          |
| 18         | 183.31 +/- 1                        | 1.06                    | 16                          |
| 19         | 183.31 +/- 3                        | 0.70                    | 16                          |
| 20         | 183.31 +/- 7                        | 0.60                    | 16                          |

TABLE II  
BIOSPHERE-ATMOSPHERE TRANSFER SCHEME (BATS) VEGETATION CLASSES

| Classes | Legend                     |
|---------|----------------------------|
| 1       | Crops, Mixed Farming       |
| 2       | Short Grass                |
| 3       | Evergreen Needleleaf Trees |
| 4       | Deciduous Needleleaf Tree  |
| 5       | Deciduous Broadleaf Trees  |
| 6       | Evergreen Broadleaf Trees  |
| 7       | Tall Grass                 |
| 8       | Desert                     |
| 9       | Tundra                     |
| 10      | Irrigated Crops            |
| 11      | Semi-desert                |
| 12      | Ice Caps and Glaciers      |
| 13      | Bogs and Marshes           |
| 14      | Inland Water               |
| 16      | Evergreen Shrubs           |
| 17      | Deciduous Shrubs           |
| 18      | Mixed Forest               |
| 19      | Interrupted Forest         |
| 20      | Water and Land Mixtures    |



- FIGURE 1 : MONTHLY MEAN AMSU EMISSIVITIES FOR JANUARY, FEBRUARY, MARCH, APRIL, JULY, AND AUGUST 2000 WITH RESPECT TO 30 SCAN POSITIONS ( $\pm 58^\circ$  OF ZENITH ANGLE VARIATION, SCAN POSITIONS 15 AND 16 CORRESPOND TO NADIR) AT 23.8, 31.4, 50.3, AND 89 GHZ FREQUENCIES OVER BOTH DESERT AND DENSE VEGETATION AREAS. \_\_\_\_ 80
- FIGURE 2 : THE OBTAINED FITTED AMSU EMISSIVITIES USING THE EMISSIVITY PARAMETERIZATION WITH RESPECT TO 30 SCAN POSITIONS ( $\pm 58^\circ$  OF ZENITH ANGLE VARIATION) AT 23.8, 31.4, 50.3, AND 89 GHZ FREQUENCIES OVER (A) DESERT, (B) SEMI-DESERT, (C) TALL GRASS, AND (D) INTERRUPTED FOREST AREAS. THE PARAMETERIZATION IS BASED ON DATA FROM FEBRUARY 2000. \_\_\_\_\_ 81
- FIGURE 3: (A) MEAN AUGUST EMISSIVITY MAP (30X30 KM) AT 31.4 GHZ GENERATED FROM PREVIOUSLY CALCULATED EMISSIVITIES DIRECTLY FROM SATELLITE OBSERVATIONS AT ALL ZENITH ANGLES, (B) THE MEAN AUGUST EMISSIVITY BIASES IN % BETWEEN THE CALCULATED AND THE SIMULATED EMISSIVITY USING THE SIMPLIFIED EMISSIVITY PARAMETERIZATION APPROACH AT 31.4 GHZ AND FOR ALL ZENITH ANGLES, AND (C) THE MEAN AUGUST EMISSIVITY BIASES IN % BETWEEN THE CALCULATED AND THE SIMULATED EMISSIVITY USING THE COMPLEMENTARY EMISSIVITY PARAMETERIZATION APPROACH AT 31.4 GHZ AND FOR ALL ZENITH ANGLES. \_\_\_\_\_ 82
- FIGURE 4: MONTHLY MEAN TBS MAPS OBTAINED FROM (A) ALL AMSU JANUARY OBSERVATIONS AT 23 GHZ, (B) SIMULATIONS USING SIMPLIFIED EMISSIVITY PARAMETERIZATION APPROACH FROM THE SAME PERIOD AND AT 23 GHZ, AND (C) SIMULATIONS USING THE COMPLEMENTARY EMISSIVITY PARAMETERIZATION FROM JANUARY AT 23 GHZ. (D), (E), AND (F) SAME AS (A), (B), AND (C) BUT USING DATA FROM APRIL 2000 AT 50.3 GHZ. FIGURES (G), (H), AND (I) ARE SAME AS (A), (B), AND (C) BUT USING DATA FROM JULY 2000 AT 89 GHZ. \_\_\_\_\_ 83
- FIGURE 5: HISTOGRAMS OF THE TBS DIFFERENCE BETWEEN MEASUREMENTS AND SIMULATIONS FROM AUGUST 2000, FOR 23.8 GHZ, FOR (A) LOW ZENITH ANGLES ( $\leq 20^\circ$ ) AND DESERT, (B) HIGH ZENITH ANGLES ( $> 40^\circ$ ) AND DESERT, (C) LOW ZENITH ANGLES AND FOREST, AND (D) HIGH ZENITH ANGLES AND FOREST. THE TBS SIMULATIONS HAVE BEEN CALCULATED USING (1) FIXED EMISSIVITY (0.95) (DASHED DOTTED LINES), (2) USING EMISSIVITIES ESTIMATED BY THE SIMPLIFIED APPROACH (SOLID LINES), AND (3) USING EMISSIVITIES ESTIMATED BY THE COMPLEMENTARY APPROACH (SOLID LINE WITH DIAMOND SYMBOLS). \_\_\_\_\_ 84
- FIGURE 6: MONTHLY RMS OF ERRORS MAPS FOR AUGUST 2000 OBTAINED BY CALCULATING THE DIFFERENCES BETWEEN THE OBSERVED TBS AND (A) THE SIMULATED TBS USING SIMPLIFIED EMISSIVITY PARAMETERIZATION APPROACH FOR 23.8 GHZ CHANNEL, AND (B) THE SIMULATED TBS USING THE COMPLEMENTARY EMISSIVITY PARAMETERIZATION FOR THE SAME CHANNEL. SUBPLOTS (C) AND (D) ARE SIMILAR TO (A) AND (B) BUT FOR 31.4 GHZ CHANNEL. SUBPLOTS (E) AND (F) ARE SIMILAR TO (A) AND (B) BUT FOR 50.3 GHZ CHANNEL. SUBPLOTS (G) AND (H) ARE SIMILAR TO (A) AND (B) BUT FOR 89 GHZ CHANNEL. \_\_\_\_\_ 85

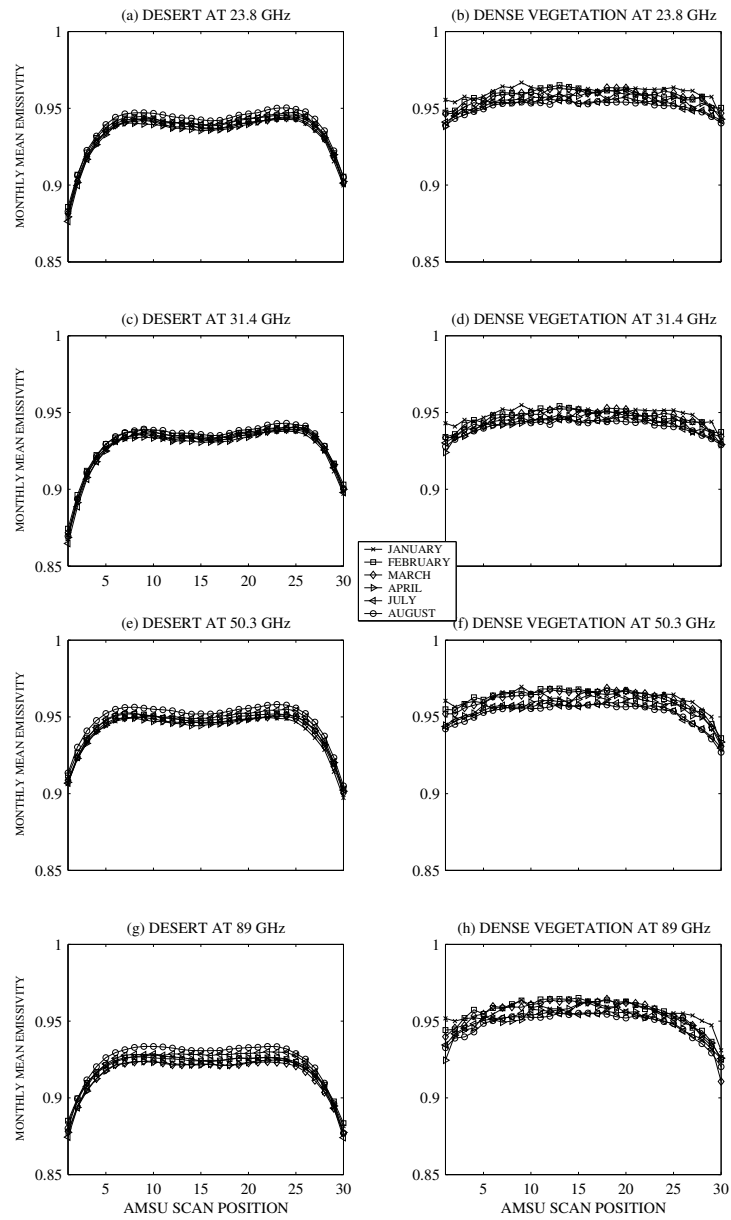


Figure 1 : Monthly mean AMSU emissivities for January, February, March, April, July, and August 2000 with respect to 30 scan positions ( $\pm 58^\circ$  of zenith angle variation, scan positions 15 and 16 correspond to nadir) at 23.8, 31.4, 50.3, and 89 GHz frequencies over both desert and dense vegetation areas.

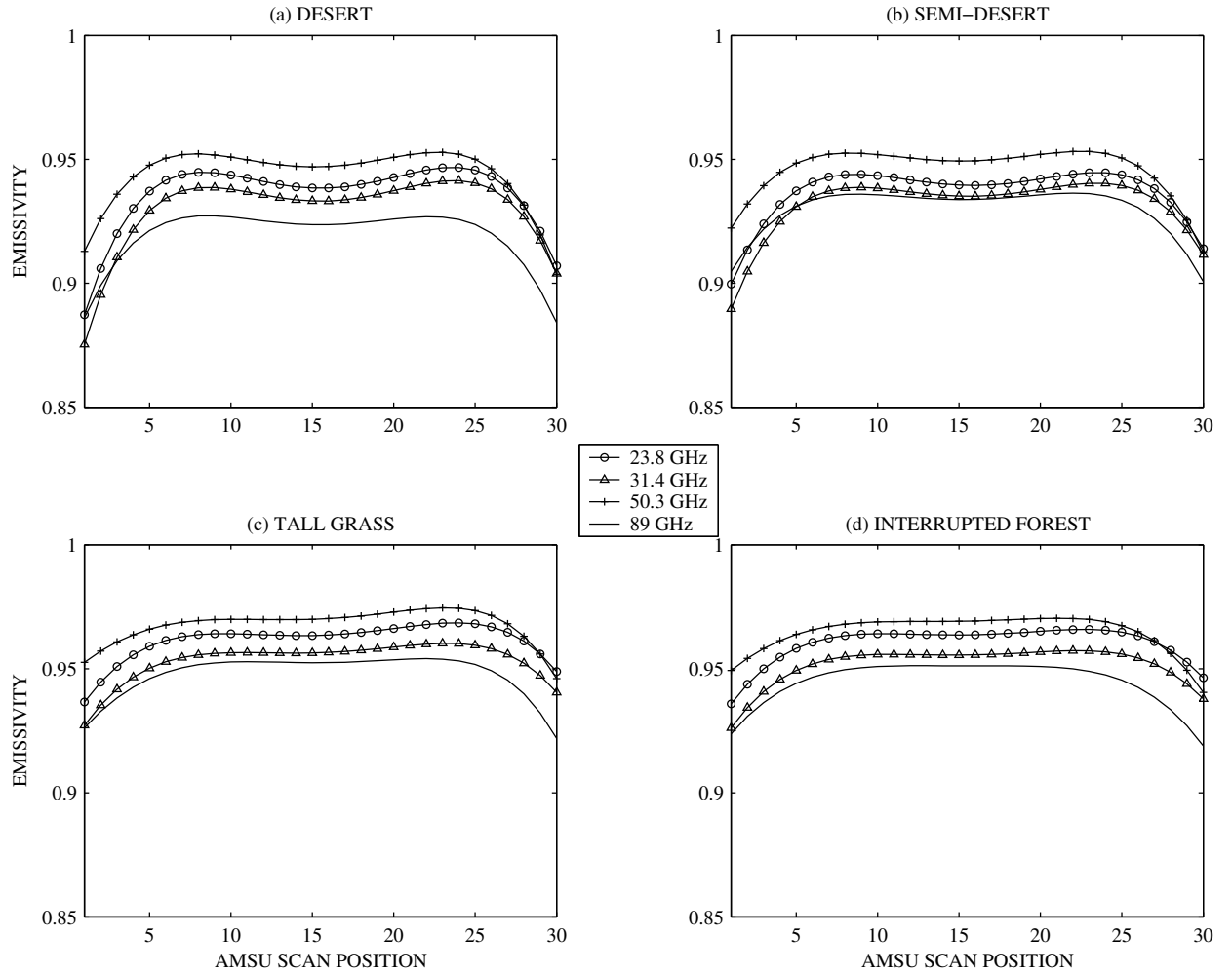


Figure 2 : The obtained fitted AMSU emissivities using the emissivity parameterization with respect to 30 scan positions ( $\pm 58^\circ$  of zenith angle variation) at 23.8, 31.4, 50.3, and 89 GHz frequencies over (a) desert, (b) semi-desert, (c) tall grass, and (d) interrupted forest areas. The parameterization is based on data from February 2000.

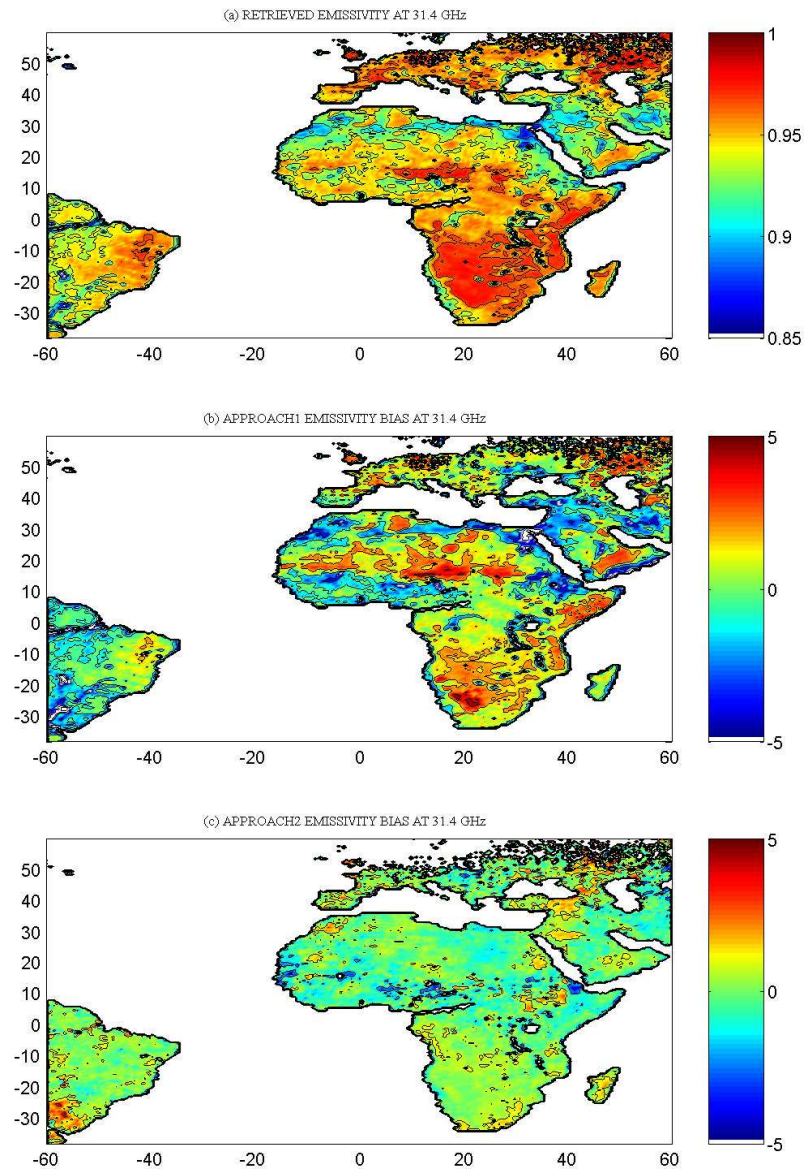


Figure 3: (a) Mean August emissivity map (30x30 km) at 31.4 GHz generated from previously calculated emissivities directly from satellite observations at all zenith angles, (b) the mean August emissivity biases in % between the calculated and the simulated emissivity using the simplified emissivity parameterization approach at 31.4 GHz and for all zenith angles, and (c) the mean August emissivity biases in % between the calculated and the simulated emissivity using the complementary emissivity parameterization approach at 31.4 GHz and for all zenith angles.

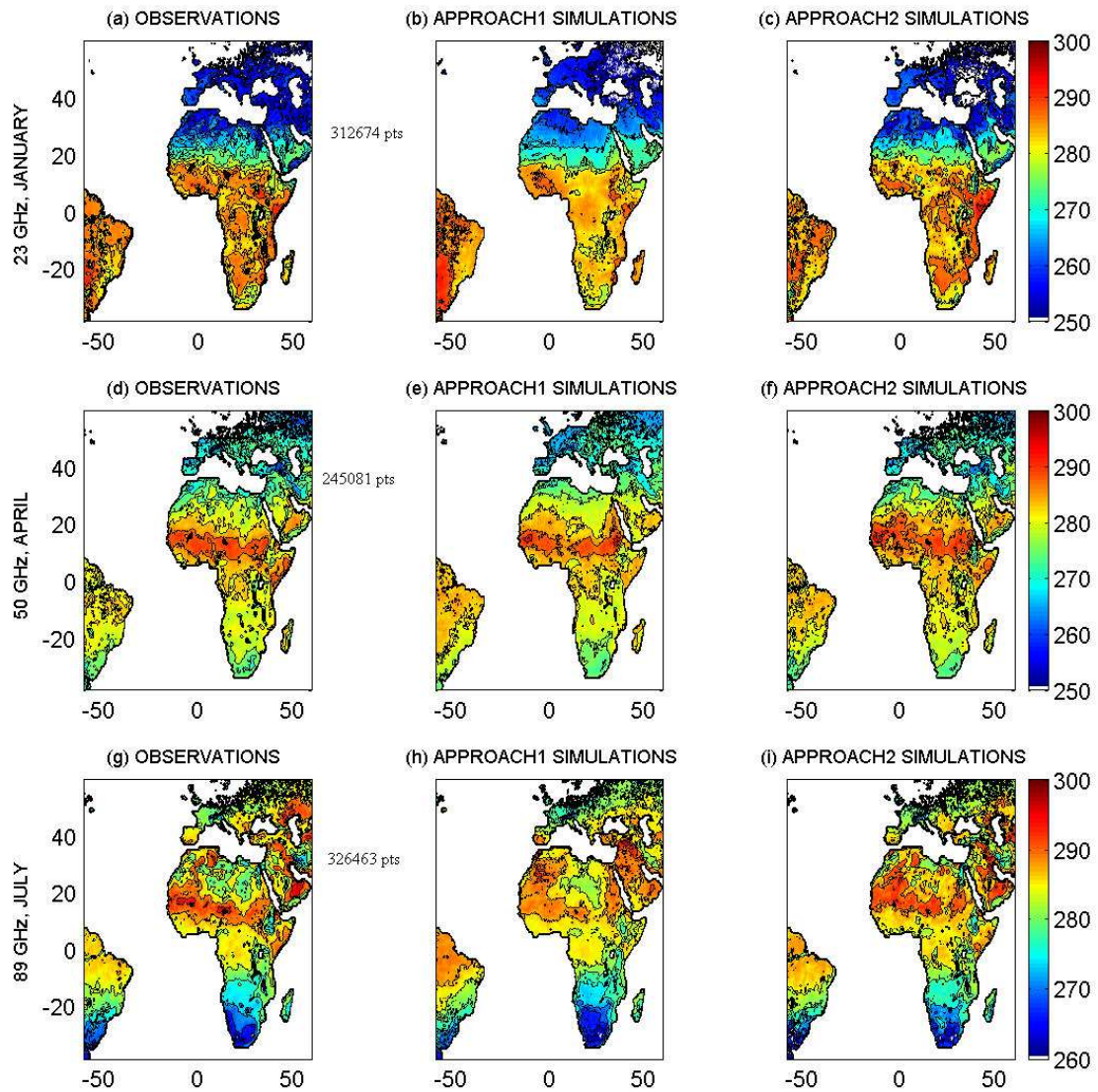


Figure 4: Monthly mean Tbs maps obtained from (a) all AMSU January observations at 23 GHz, (b) simulations using simplified emissivity parameterization approach from the same period and at 23 GHz, and (c) Simulations using the complementary emissivity parameterization from January at 23 GHz. (d), (e), and (f) same as (a), (b), and (c) but using data from April 2000 at 50.3 GHz. Figures (g), (h), and (i) are same as (a), (b), and (c) but using data from July 2000 at 89 GHz.

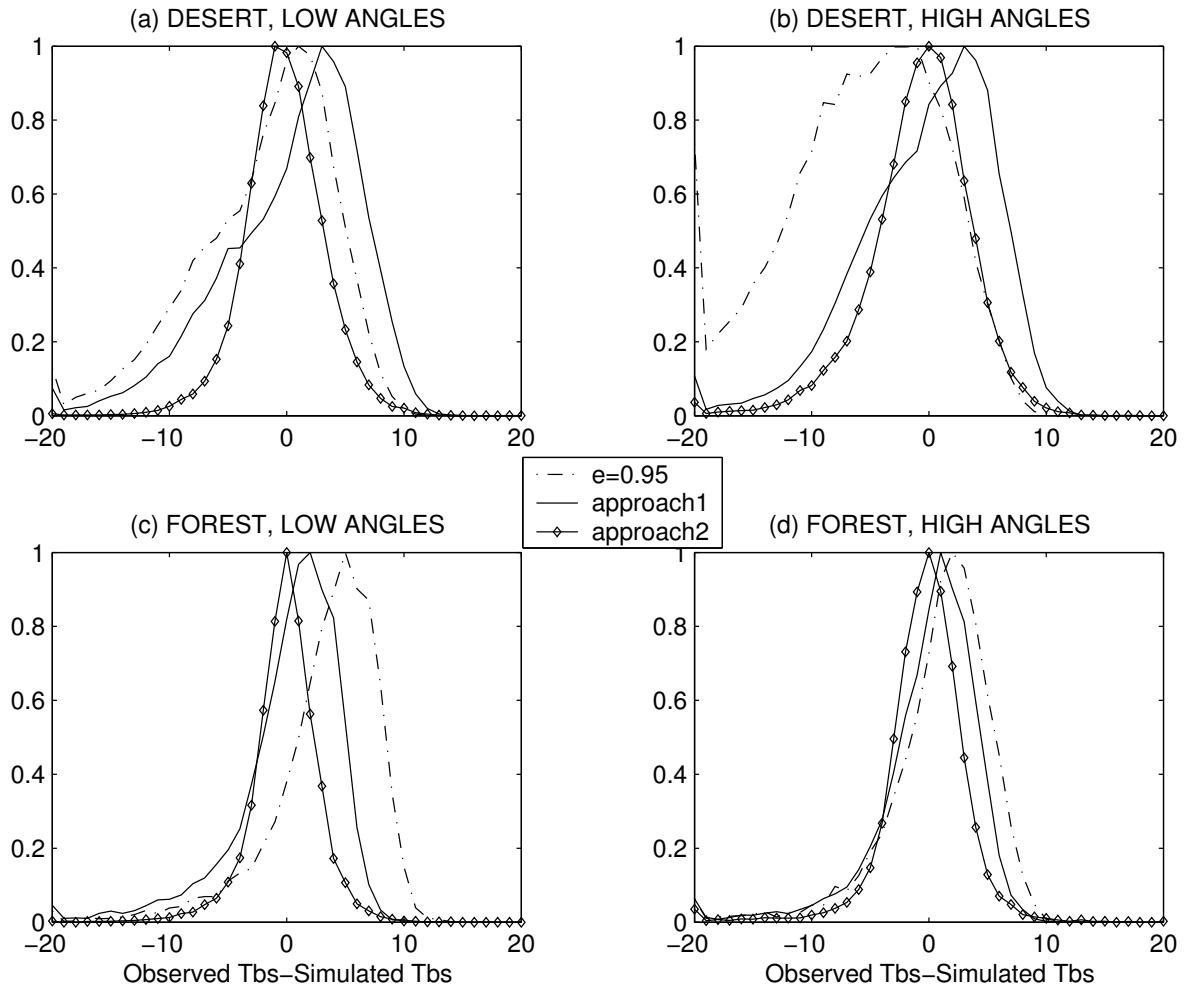


Figure 5: Histograms of the Tbs difference between measurements and simulations from August 2000, for 23.8 GHz, for (a) low zenith angles ( $\leq 20^\circ$ ) and desert, (b) high zenith angles ( $> 40^\circ$ ) and desert, (c) low zenith angles and forest, and (d) high zenith angles and forest. The Tbs simulations have been calculated using (1) fixed emissivity (0.95) (dashed dotted lines), (2) using emissivities estimated by the simplified approach (solid lines), and (3) using emissivities estimated by the complementary approach (solid line with diamond symbols).

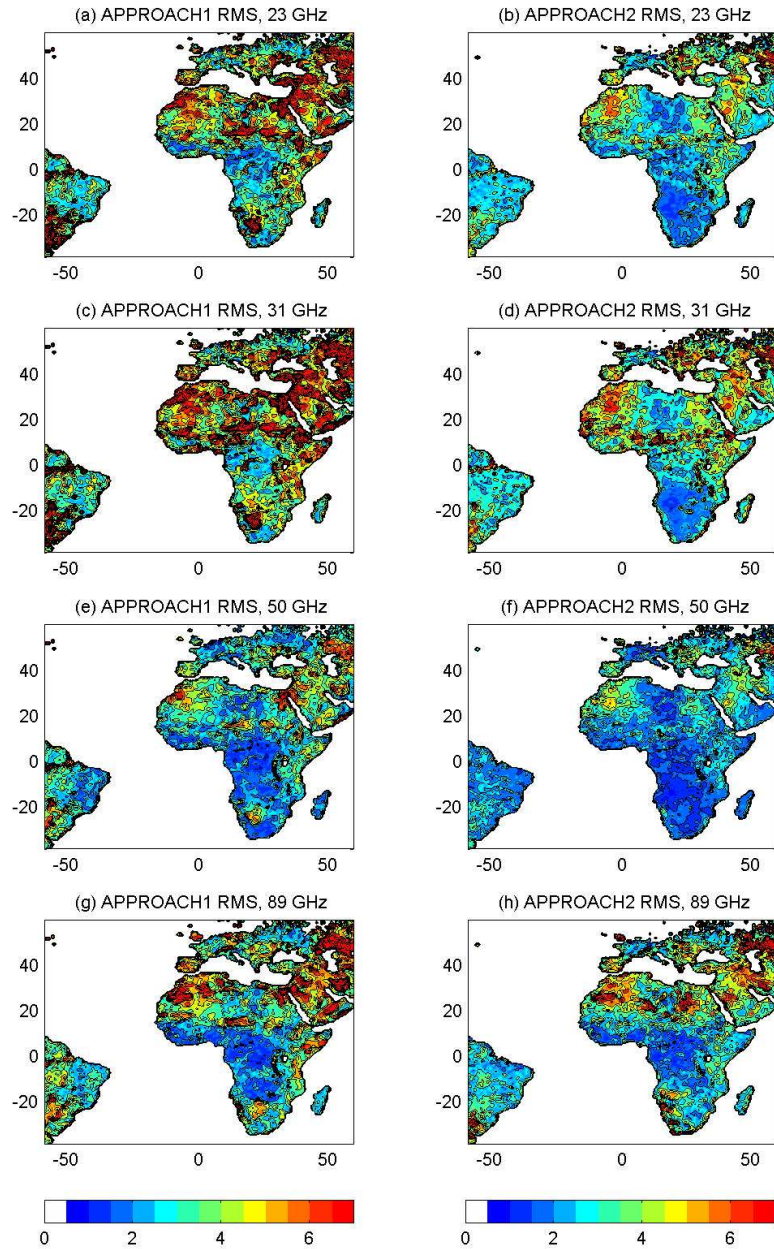


Figure 6: Monthly RMS of errors maps for August 2000 obtained by calculating the differences between the observed Tbs and (a) the simulated Tbs using simplified emissivity parameterization approach for 23.8 GHz channel, and (b) the simulated Tbs using the complementary emissivity parameterization for the same channel. Subplots (c) and (d) are similar to (a) and (b) but for 31.4 GHz channel. Subplots (e) and (f) are similar to (a) and (b) but for 50.3 GHz channel. Subplots (g) and (h) are similar to (a) and (b) but for 89 GHz channel.

## CHAPITRE 6

---

### INVERSION DES MESURES AMSU AU DESSUS DES CONTINENTS

---

Ce chapitre est basé sur : Karbou, F., F. Aires, C. Prigent, and L. Eymard, (2004): Potential of AMSU-A and -B measurements for atmospheric temperature and humidity profiling over land, *J. Geophys. Res.*, (soumis)

|          |  |           |
|----------|--|-----------|
| <b>6</b> | <b>INVERSION DES MESURES AMSU AU DESSUS DES CONTINENTS</b> | <b>87</b> |
| 6.1.     | INTRODUCTION   | 87        |
| 6.2.     | PUBLICATION ASSOCIEE AU CHAPITRE                           | 90        |



---

## 6 INVERSION DES MESURES AMSU AU DESSUS DES CONTINENTS

---

### 6.1. INTRODUCTION

On a vu précédemment que les mesures AMSU-A et –B, présentent un grand intérêt pour la communauté scientifique car elles contiennent des informations précieuses sur la distribution atmosphérique de température et d’humidité. Plusieurs techniques de restitutions de profils de température et/ou d’humidité ont été développées en utilisant des données issues des sondeurs AMSU ou bien d’autres sondeurs micro onde. Cependant, ces restitutions ont été principalement effectuées au dessus d’une surface océanique ou bien d’une surface à émissivité constante (*Rosenkranz (2001), Wagner et al. (1990), Shi (2001), et Franquet (2003)*).

Au-dessus des océans, les mesures AMSU sont maintenant assimilées dans plusieurs centres météorologiques. Par contre les mesures au dessus des continents ne sont assimilées que si elles sont issues de canaux non sensibles à la surface. Le tableau 6-1 résume l’état actuel d’assimilation des mesures issues de METEOSAT, ATOVS et SSMI à Météo-France et au Centre européen.

Tableau 6-1 : Etat actuel de l'assimilation de certaines données satellitaires à Météo-France et au centre européen.

|          | Paramètres assimilés          | Mer   | Terre  | Conditions  |
|----------|-------------------------------|---|--|---|
| METEOSAT | Radiances                     |   |  | Canal de vapeur d'eau. Uniquement quand la fraction ciel clair > 70%, angle satellite zénithal < 60° et altitude du modèle < 1500m. (source Gerard et al. 2003) |
| ATOVS    | Radiances                     | - AMSU-A:Ch5-12<br>- AMSU-B:Ch18-20<br>- HIRS:Ch4-7,11,12,14,15 | -AMSU-A:Ch5-12<br>-AMSU-B :Ch19-20<br>- HIRS : moins de canaux | Diverses conditions de température de surface, d'altitude du modèle, de nuages. (source Gerard et al. 2003)   |
| SSM/I    | Contenu total de vapeur d'eau | oui   |  | Uniquement sur mer (source site web de l'ECMWF)   |

Le potentiel de sondage de température et d'humidité des instruments AMSU se trouve ainsi partiellement inexploité. En effet, il est relativement plus simple de séparer les contributions relatives de la surface et de l'atmosphère pour le signal reçu par le satellite au-dessus d'une surface marine qu'au-dessus des continents. L'émissivité de l'océan est faible contrairement à celle des surfaces continentales souvent proche de 1.0. En outre, l'émissivité des terres montre des variations temporelles et spatiales assez complexes et dépend des caractéristiques de surface telle la rugosité, l'humidité du sol, entre autres éléments de surface. Par conséquent une bonne estimation de l'émissivité de surface continentale dans le domaine des hyperfréquences est un préalable à une pleine exploitation des mesures AMSU au-dessus des terres. Dans cette optique, l'émissivité de surface a d'abord été estimée aux fréquences et aux conditions d'observation des instrument AMSU (*Karbou et al*, 2004, TGRS). Le lecteur peut se référer au chapitre 3, pour davantage de détails concernant cette étude. Ainsi, connaissant l'émissivité de surface, il est maintenant possible de développer des techniques de restitution des profils de température et d'humidité pour pleinement exploiter les données AMSU au-dessus des continents. L'intérêt de la restitution des profils atmosphériques au-dessus de régions comme l'Afrique est grand à cause du nombre insuffisant de radiosondages au-dessus de ce continent.

L'objectif du travail présenté dans ce chapitre, est d'étudier la faisabilité de l'inversion des mesures AMSU au dessus des continents pour la restitution des profils de température et d'humidité en situation de ciel non nuageux. Il s'agit donc d'évaluer le contenu en information des mesures AMSU au-dessus des terres quand elles sont combinées à des données auxiliaires décrivant la surface (émissivité et température de surface). Le but final

de cette étude est d'étudier et de préparer l'assimilation de toutes les mesures des instruments AMSU au-dessus des terres dans un modèle de prévision numérique du temps.

L'analyse du contenu en information des observations issues des instruments AMSU est basée sur une approche statistique neuronale (NN), avec l'utilisation d'informations a priori et auxiliaires. Dans le cadre de l'inversion des mesures AMSU, on cherche à caractériser les cohérences et les corrélations entre les données d'entrée/sortie. La base de donnée a été construite pour trouver les relations entre les données satellitaires, les données de surface et les données atmosphériques. La séparation de cette base en bases de test et d'apprentissage permet de tester la robustesse de la méthode d'inversion quand elle est appliquée sur une base différente de celle d'apprentissage. En résumé, ce qui nous intéresse dans cette approche c'est de trouver le lien entre observations et profils atmosphériques de température et d'humidité.

La méthode a été appliquée sur une grande base de données incluant diverses situations de surface et d'atmosphère. En effet, deux mois contrastés ont été choisis pour garantir une variabilité saisonnière suffisante. De plus, la région géographique d'étude est centrée sur l'Afrique, L'Europe en plus de quelques régions d'Asie et d'Amérique latine (60S, 60N, 60E, 60W). Avec la pénurie de radiosondages sur l'Afrique, l'obtention de profils atmosphérique de température et d'humidité fiables sur ce continent présente un intérêt majeur.

L'étude détaillée de l'inversion des mesures issues des instruments AMSU-A et -B au dessus des surfaces continentales, est présentée dans la publication jointe à ce chapitre.

## 6.2.PUBLICATION ASSOCIEE AU CHAPITRE

Karbou, F., F. Aires, C. Prigent, and L. Eymard, (2004): Potential of AMSU-A and -B measurements for atmospheric temperature and humidity profiling over land, *J. Geophys. Res.*, (*A paraître*)

Article soumis le 5 août 2004, Accepté le 15 décembre 2004.

# Potential of AMSU-A and -B measurements for atmospheric temperature and humidity profiling over land

Fatima KARBOU

**CNRS / IPSL / CETP, France**

Filipe AIRES

**CNRS / IPSL / LMD, France**

Catherine PRIGENT

**CNRS / Observatoire de Paris / LERMA, France**

Laurence EYMARD

**CNRS / IPSL / LODYC, France**

Submitted to: Journal of Geophysical Research-Atmospheres

(Manuscript Number: 2004JD005318)

Submitted on August 5<sup>th</sup>, 2004

Revised on October 8<sup>th</sup> and December 1<sup>st</sup> 2004

Accepted on December 15<sup>th</sup>, 2004

**Corresponding author:**

Fatima KARBOU

10-12, Avenue de l'Europe

78140, Vélizy, France

Email: [fatima.karbou@cetp.ipsl.fr](mailto:fatima.karbou@cetp.ipsl.fr)

Tel. + 33 1 39 25 39 28

Fax: +33 1 39 25 47 78

---

**Abstract—** A neural network retrieval method has been applied to investigate AMSU-A/-B atmospheric temperature and humidity profiling capabilities over land. The retrieval method benefits from a reliable estimate of the land emissivity and skin temperature as well as first guess information regarding the temperature-humidity profiles. It has been applied on a large geographic area (60°W-60°E; 60°S-60°N) and atmospheric situations (winter and summer). The retrieved RMS errors are within 2 K and 9% in temperature and relative humidity respectively. Regardless scanning conditions, vegetation types and atmospheric situations, the algorithm retrieval results are satisfactory for both temperature and relative humidity. The retrieval approach has been evaluated by comparison with available *in situ* measurements.

**Index Terms—**AMSU, microwave surface emissivity, atmospheric temperature and humidity profiles.

## 1. INTRODUCTION

The Advanced Microwave Sounding Unit (AMSU) A and B on board the latest generation of the National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) polar orbiting satellites measure the outgoing radiances from the atmosphere and the Earth surface. With channels in the oxygen absorption band, AMSU-A is designed to retrieve the atmospheric temperature from about 3 hPa (~45 km) down to the Earth's surface. AMSU-B module makes measurements in the vicinity of the strong water vapor absorption line at 183 GHz and is used for atmospheric water vapor sounding. Therefore, the use of AMSU measurements in operational Numerical Weather Prediction (NWP) models can potentially provide accurate monitoring of both air temperature and moisture profiles with good temporal and spatial sampling. Compared to infrared sounding measurements, AMSU observations are less sensitive to high thin and non precipitating clouds.

Several retrieval techniques have been developed for temperature and/or humidity sounding with AMSU-A/B and other microwave radiometer measurements. Rosenkranz [2001] used surface and atmosphere modeling to retrieve temperature-moisture profiles from AMSU-A/B data. Wagner et al. [1990] retrieved humidity profiles using passive microwave measurements. A neural network technique has been used by Shi [2001] to estimate air temperature profiles from AMSU-A; a similar technique has been utilized by Franquet [2003] for 3-D restitution of water vapor using microwave satellite instruments.

Over ocean, the AMSU measurements are now routinely assimilated in NWP systems and they provide unique atmospheric profiling capabilities. Over land however, the AMSU measurements are not fully exploited. At best, only the channels that are not contaminated by surface contributions are assimilated, thus limiting the profiling potential to the higher atmospheric layers. Kelly and Bauer [2000] describe the current use of 10 AMSU channels measurement in the European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF) assimilation system. Recent efforts to assimilate AMSU radiances over ocean/land are performed at many NWP centers [TOVS study conference, 2003]. Contrarily to the ocean emissivity, the land surface emissivity is high, often close to unity, leading to difficulties in discriminating between surface and atmosphere contributions. In addition, the land emissivity exhibits complex temporal and spatial variations, depending on surface types, roughness, and moisture content, among other parameters. As a consequence an accurate estimate of the microwave land emissivity is a prerequisite for a full exploitation of satellite sounding measurements over land. Recent works focused on the development and analysis of emissivity estimates at AMSU frequencies and observation conditions [Karbou et al., 2004], following the method developed for the Special Sensor Microwave/ Imager [Prigent et al., 1997; 1998]. It

is thus now possible to develop retrieval techniques to fully benefit from microwave sounder measurements over land, as it has already been done for microwave imagers [Prigent and Rossow, 1999; Aires et al., 2001].

The objective of this paper is to study the feasibility of use of all AMSU-A and -B channels over land for retrieving atmospheric temperature and moisture profiles down to the surface; then to evaluate the performances of the retrieval method by quantifying the information content of the AMSU-A and -B observations for such retrievals over land. The final aim of this study is to investigate and prepare the assimilation (variational method) of all AMSU channel measurements over land in NWP models. The information content analysis is based on neural network (NN) statistical approach, with use of a first guess profile and auxiliary information (surface temperature and emissivity). Compared to more traditional information content techniques [Rodgers, 1990], using a NN has the advantage of requiring none of theoretical assumptions such as linearity or the Gaussian character of the variables. Our approach consists in designing a NN retrieval scheme procedure, to apply it to a large set of realistic atmospheric situations, and to analyze the impact of the satellite observations on the retrieved products. Two contrasted months of AMSU data are analyzed over a large part of the globe centered on Africa. In this preliminary study, only cloud free data have been selected to conduct the atmospheric retrievals. Given the scarcity of the radiosonde measurements over large parts of Africa, it is of primary importance to get reliable satellite estimates of the temperature and humidity profiles in this region.

The AMSU observations and the emissivity dataset are described in section 2. The retrieval approach is presented in section 3 and its results are analyzed with respect to the AMSU zenith angle, season, and the vegetation type. Additional analysis regarding the ECMWF first guess information is provided in section 4 as well as an evaluation of the retrieval method by comparison with radiosonde measurements. Section 5 concludes this study.

## 2. Satellite observations and emissivity datasets

### 2.1. AMSU-A AND -B MEASUREMENTS

The AMSU sounding unit operates on board the NOAA satellites since 1998. AMSU-A has 12 channels located close to the oxygen absorption lines below 60 GHz and four window channels at 23.8, 31.4, 50.3, and 89 GHz. AMSU-B has two window channels at 89 and 150 GHz and three channels centered on the 183.31 GHz water vapor line. The two instruments have instantaneous fields of view of  $3.3^\circ$  and  $1.1^\circ$  and sample 30 and 90 Earth views respectively. Therefore, the AMSU observation scan angle varies from  $-48^\circ$  to  $+48^\circ$  with the corresponding local zenith angle reaching  $58^\circ$ . Channel characteristics for both AMSU-A



and -B radiometers are given in Table 1 and a detailed description of the AMSU sounders is reported in *Goodrum et al.* [2000].

Level 1b AMSU data have been obtained from the Satellite Active Archive (SAA) and processed using the Advanced ATOVS Processing Package (AAPP) created and distributed by EUMETSAT and co-operations. The AMSU radiances are corrected from the AMSU antenna effect using coefficients given by *Mo* [1999] and *Hewison et al.* [1996]. The analysis in this study is made at AMSU-A spatial resolution. Data have been selected to cover a large geographic area including mainly Africa but also Eastern South America, Southern Europe, and the Middle East (from 60°W to 60°E in longitude and from 60°S to 60°N in latitude). The study is performed for January and August 2000. At that time, NOAA 15 is in sun-synchronous polar orbit and crosses the equator at local solar times of approximately 7:30 a.m. and 19:30 p.m.

In the present work, the AMSU information content analysis is conducted over land and under cloud free situations. Once our experience results are thoroughly validated, the analysis will be extended to cloudy situations. Clouds have a complex and highly variable impact on the observed microwave radiances, depending on both the cloud property and the observation frequency. Cloud screening is conducted using the International Satellite Cloud Climatology Project (ISCCP) datasets. Cloud parameters and skin temperatures are extracted from the ISCCP pixel level data (the DX dataset) for January and August 2000. These products are available at 30 km ground resolution every 3 hours. Within ISCCP, information about clouds is obtained from visible and infrared measurements from polar and geostationary satellites, using radiative analysis [*Rossow and Schiffer*, 1991].

Figure 1 shows the weighting function distributions for all AMSU channels calculated for a US standard tropical atmosphere at nadir using a microwave radiative transfer model [*Pardo et al.*, 2001]. The weighting functions indicate the relative contribution of each atmospheric layer to the measured radiance. For a given atmosphere and frequency, the peak altitude in the weighting function increases with increasing zenith angle. This is due to increasing optical path length between the satellite and the Earth when the instruments scan from nadir to higher angles. In window channels the weighting function peaks have their maximum closer to the surface. Most of the radiation measured by these window channels comes from the surface and the boundary layer and these channels can be used to derive total precipitable water, precipitation rate, or cloud liquid water over ocean [*Grody et al.*, 2001; *Zhao and Weng*, 2002, *Weng et al.* 2003]. For all the channels that have some contribution coming from the surface, it is important to accurately estimate the surface emission in order to correctly separate its effect from the atmospheric one.

AMSU observes the Earth with a large range of angles leading to difficulties when developing retrieval algorithms: the angular dependence has to be taken into account in the inversion algorithm. Alternative

techniques have been developed to convert the observed radiance at a given angle to the radiance that would be measured at nadir. *Goldberg et al.* [2001] for instance describe the limb adjustment of AMSU-A observations to nadir. In the present study, no limb correction method is applied. All AMSU-A scan positions are considered and the retrieval accuracy will be evaluated for all angles. Figure 2 shows the mean Brightness Temperatures (Tbs) against the local zenith angle observed for cloud-free situations in January and August 2000. The observations have been sorted by vegetation types using the Biosphere-Atmosphere Transfer Scheme (BATS) vegetation land cover dataset (available at 30×30 km grid resolution) [Dickinson *et al.*, 1986]. The BATS vegetation classification is a complex combination of three surface climatology classifications obtained from *Matthews* [1983], *Olsen et al.* [1983], and from *Wilson* [1984] described in *Wilson et al.* [1987]. The angular variations of the Tbs are driven by two phenomena, depending on the channel opacity: for window channels the angular dependence of the emissivity prevails whereas for sounding channels the opacity increase with angle is the dominant effect. Surface and near-surface channel (23.8, 31.4, 50.3, 89.0, and 150 GHz) Tb curves show a similar trend as those observed while analyzing the angular emissivity variation [Karbou *et al.*, 2004]. Figure 3 shows the mean monthly emissivities at 31.4 GHz over desert, calculated for 6 months of data, and sorted by beam observation angle; the emissivity curve show similar trend than the mean Tb curve at 31.4 GHz over desert (Figure 2). Most of the angular variations in surface and near-surface channels are related to the surface emissivity angular dependence. *Mo* [2002] made similar observations when comparing mean Tbs and emissivities from AMSU-A channels over the Libyan Desert. As a consequence, an accurate estimate of the emissivity is required for the full incidence angle ranges to properly account for the surface contribution to the measured radiance at each scan angle.

For this purpose, the microwave land surface emissivities at AMSU frequencies have been studied [Karbou *et al.*, 2004] and this work is briefly described in the next section.

## 2.2. AMSU LAND EMISSIVITY CALCULATIONS

The AMSU land surface emissivities have been calculated under the assumption of a flat and specular surface, using data from year 2000, for 30 observation zenith angle ranges (from -58° to +58°) and for the 23.8, 31.4, 50.3, 89, and 150 GHz channels after separating cloud and atmospheric contributions [Karbou *et al.*, 2004]. For the emissivity calculations only cloud free data have been considered. Collocated visible/infrared satellite measurements from ISCCP data have been used to screen cloud and rain effects and to provide an accurate estimate of the skin temperature. The nearby temperature-humidity profiles from the ECMWF [Simmons and Gibson, 2000] have been used as input into a state-of-the-art microwave

radiative transfer model [Pardo *et al.*, 2001] in order to estimate the atmospheric contribution to the measured radiances.

The obtained monthly-mean emissivity maps show the expected spatial structures, related to changes in surface types. Lakes and rivers as well as the coastlines are associated with low emissivities at all frequencies but also with high emissivity variability. For the entire datasets, the day-to-day emissivity standard deviations are generally less than 2% in AMSU surface channels and tend to increase with frequency and zenith angles. *English* [1999] showed that the use of land emissivity with accuracy better than 2% would help humidity profile retrievals over land. For all frequencies, the emissivities depend on the incidence angle, especially for bare soil areas. Figure 3 illustrates this angular variation at 31.4 GHz for desert surfaces for 6 months of data. This Figure also shows an asymmetry along the AMSU scan, relatively to nadir, variable with frequency and surface emissivity. For all vegetation classes, the AMSU scan asymmetry is found to be higher at 31.4 GHz than at the other frequencies. The maximum scan asymmetry (difference between the monthly mean emissivities at scan position 1 and 30) for this channel reaches up to 3% over desert areas. The 23 GHz channel is also affected by the scan asymmetry but the magnitude of this effect is smaller (2.4 % over desert surfaces). Measurements at 89 GHz appear to be less sensitive to the scan asymmetry than those at 50.3 GHz. *Weng et al.* [2003] also noticed an asymmetry in AMSU surface channels by using AMSU ocean observations and simulations. The AMSU scan asymmetry is likely related to an instrument calibration problem. For effective retrievals of atmospheric variables over ocean and land, the instruments have to be accurately calibrated for all conditions (frequencies and scanning positions). This asymmetry is being investigated in order to suggest adequate corrections. The likely instrumental problem is accounted for by using mean emissivities sorted by scan position. Therefore, in the present study, the observations are systematically sorted by scan position angle. Pre-calculated AMSU mean monthly emissivity maps for January and August 2000, with a ground resolution of 30x30 km, and at 23, 31, 50, 89 and 150 GHz are used to characterize the land contribution to the measured radiances. The emissivities in the sounding channels have not been calculated because the surface contribution at these frequencies is not strong enough to derive reliable estimates. Given the smooth and limited frequency dependence of the land surface emissivities in this wavelength range [Prigent *et al.*, 2000; Karbou *et al.*, 2004], the emissivities in the window channels can be extrapolated from their estimates in the nearest sounding channels. For example, mean emissivities at 50 GHz have been used for channels in the vicinity of the 50-60 GHz channels band. By the same token, emissivities calculated at 150 GHz have been used for the 183.31 GHz channels.

### 3. An Information Content Analysis

#### 3.1. THE NEURAL NETWORK APPROACH

The first stage in developing a Neural Network (NN) retrieval scheme is to obtain a dataset of samples describing the relationships between the inputs (i.e., satellite observations and *a priori* information) and the outputs (i.e., variables to retrieve). For this purpose, AMSU measurements and collocated ECMWF re-analyses [Simmons and Gibson, 2000] are selected. An alternative would be to simulate AMSU observations with a radiative transfer model using ECMWF atmospheric profiles but in this case the instrument noise would need to be specified, and this information is not directly available in this context. For each AMSU measurement, the closest (in space and time) atmospheric situation from ECMWF to the actual AMSU observation is defined as the target that the NN has to retrieve. Consequently, the procedure includes several sources of observation errors: the instrument noise, differences in space/time collocation, differences in spatial resolution, as well as the error of the ECMWF re-analysis itself related to the NWP model errors.

The NN algorithm is developed to retrieve simultaneously the atmospheric temperature and humidity profiles over land using AMSU-A and -B observations at 21 fixed pressure levels from 1000 to 1hPa. In addition to satellite measurements, the NN retrieval scheme benefits from other sources of information: *a priori* and first guess information can be used to better constrain the inversion problem and to limit non-uniqueness and/or instabilities of the solution. This approach was developed by Aires *et al.* [2001] to retrieve simultaneously water vapor, cloud liquid water path, surface temperature, and microwave emissivities over land using SSM/I instrument. In the present study, the three sources of information available to perform the retrieval are:

- All AMSU-A and -B satellite observations (i.e., 19 NN inputs corresponding to each instrument frequency);
- The ECMWF atmospheric temperature and moisture profiles on 21 levels taken 6 hours before the ECMWF target profiles are used as First Guess (FG) information (i.e., 2×21 NN inputs);
- Spatially and temporally collocated ISCCP skin temperatures as well as the previously calculated emissivities at 23.8, 31.4, 50.3, 89, and 150 GHz are used as *a priori* information (i.e., 6 NN inputs). The emissivities vary with the geographic location but also with scan position and specified month (January or August). For each channel and each geographic location, the standard deviation of the day-to-day variations within a month has been calculated. The obtained standard deviations are then associated to the mean emissivities during the learning stage. The day-to-day variability of the emissivity is found within 2% for all frequencies [Karbou *et al.*, 2004].

In order to retrieve the temperature and humidity profiles (i.e.,  $2 \times 21$  NN outputs), a multi-layered perceptron [Rumelhart *et al.*, 1986] is constructed with 67 inputs, 50 neurons in the hidden layer, and 42 outputs. A schematic structure of the NN inversion scheme is provided in Figure 4.

The dataset was constructed using cloud-free AMSU Tbs from January and August 2000 in order to include a wide range of atmospheric conditions. The selected geographic area ( $60^\circ\text{W}$ - $60^\circ\text{E}$  and  $60^\circ\text{S}$ - $60^\circ\text{N}$ ) is large enough to insure variability in surface and atmospheric conditions (from arid to very moist areas). For both August and January months, 1/3 of the data are assigned to the test database whereas 2/3 of the data are attributed to the learning database. The applied data repartition allows for a good disjunction between the learning and the generalization datasets. It should be noted that we experimented different database selections (like random daily drawings) and we obtained similar statistics. This confirms the robustness of our estimate of the generalization error.

### 3.2. THE RETRIEVAL RESULTS

Figure 5 shows the RMS error profiles for temperature and humidity obtained at 21 pressure levels from 1000 to 1 hPa, regardless of scanning angle, season, and surface types. At each level, the FG RMS error profile is calculated using the difference between the target and the FG ECMWF profiles. Similarly, the NN RMS error profile is calculated using the difference between the target and the retrieved profiles. For both temperature and humidity, the retrieved profile is closer to the target profile than the FG profile, showing the benefit of AMSU radiances associated with a reliable characterization of the surface contribution. The improvement in temperature is significant at low ( $> 700$  hPa) and at high ( $< 100$  hPa) levels: the RMS improvement (difference between the FG and NN RMS errors) is about 1.4 K at 1000 hPa and greater than 0.9 K at levels with pressure lower than 10 hPa. At the lowest level, the RMS errors decrease from 3.5 K to 2.1 K for temperature and from 14.5% to 9.1% in relative humidity. In order to examine the spatial structure of the NN retrieval accuracy, FG and NN RMS error maps are plotted in Figure 6 for both temperature and humidity at 1000 hPa level. Before inversion, the maps of the difference between the FG and the target profile, for both water vapor and temperature, show a very strong longitudinal structure related to the difference between the local time of the satellite overpass and the synoptic times. The FG and target profiles being derived from the reanalysis, they are systematically obtained at the synoptic times (0, 6, 12, or 18UTC), and the time difference between these two profiles is always of 6 h. However, this time difference translates into very different temperature or relative humidity differences in the profiles, depending on the local time of the day at the given location. The maps illustrate the NN retrieval improvement with homogenous RMS error over the geographic area to be within 2 K in

temperature and 9% in humidity, regardless of the location longitude. In particular, areas with higher FG RMS error in temperature and humidity (i.e., Arabian Desert, South America) are significantly improved by the NN. There is no significant dependency between the retrieval accuracy and the surface characteristics: The NN retrievals are satisfactory regardless of the surface type.

The previous RMS error profiles have been produced with all data (January and August) and at all AMSU-A scan positions. In the next section, retrieval results are examined more closely with respect to the AMSU-A scan position, the vegetation cover, and the season.

### *3.3. SCAN ANGLE AND VEGETATION DEPENDENCIES*

AMSU-A and -B instruments scan from  $-58^\circ$  to  $58^\circ$  from nadir. The retrieved products are now analyzed to check for scan dependency in the retrieved temperature and humidity profile accuracy. Figure 7 compares the RMS error profiles in temperature and relative humidity at nadir (7.a) and at  $58^\circ$  from nadir (7.b). No significant difference is observed along the profiles between the two scanning cases for both temperature and humidity retrievals. In particular, at surface level, where scan dependencies could likely be the greatest, no significant effect can be noticed. Figure 7.c represents the NN RMS errors at 1000 hPa level as a function of the AMSU zenith angle for both temperature and relative humidity, and shows that no significant dependency exists between the surface level RMS errors and the zenith angle for both temperature and humidity. The NN improvement is within 2 K for temperature and 9% for humidity for all scanning situations; in particular, no significant deterioration of the retrievals is observed for high zenith angles. To confirm the retrieval scheme homogenous results with the scan angle, we conducted 6 retrieval experiments by training 6 independent NN for 6 limited ranges of zenith angle ( $[-58^\circ, -46^\circ]$ ,  $[-42^\circ, -26^\circ]$ ,  $[-22^\circ, \text{nadir}]$ ,  $[\text{nadir}, 22^\circ]$ ,  $[26^\circ, 42^\circ]$ , and  $[46^\circ, 58^\circ]$ ). Individual results from these experiments (not shown) do not show better retrieval accuracy than the unique NN.

Retrieved products are now analyzed by season and vegetation characteristics. Figure 8 presents the RMS error profiles for temperature and humidity calculated for desert and dense vegetation areas separately. January and August data have also been separated and all scanning conditions have been considered. For a given vegetation type, Figure 8 shows homogenous retrieval results for both temperature and humidity, for January and August. A slight improvement of the humidity RMS error at surface level can be noticed in August for desert surfaces. Figure 9 completes this analysis by showing the RMS error profiles of the retrieved parameters over desert and dense vegetation for both January and August, at nadir. The NN retrieval performs well, regardless of season, scanning situations, and vegetation types. The results show that when reliably characterizing the surface, we are able to correctly take into account the

surface variability with vegetation and scan observation angle and provides uniformly homogeneous retrievals in very diverse situations, from dry desert regions to very moist equatorial areas. Significant improvements are observed even in the lower atmospheric layers where surface contribution is important.

## 4. FURTHER ANALYSES

### 4.1. ON THE ROLE OF THE SURFACE

The information content analysis conducted in our study tends to demonstrate the potential of AMSU measurements for atmospheric profiling over land when the surface is well characterized, with both emissivity and skin temperature.

*English* [1999] made a thorough sensitivity analysis of the impact of the emissivity estimate on the humidity and temperature sounding at AMSU frequencies, in the case of variational assimilation. For the humidity sounding he concludes that the emissivity information is very important assuming a good knowledge of the skin temperature. For temperature sounding, the emissivity sensitivity is greater in presence of clouds. The present work relies on this sensitivity analysis and we choose to work in the optimum conditions (regarding the surface description) to perform the information content analysis.

In order to further investigate the role of the emissivity and the skin temperature in the retrieval, a first experiment has been performed to analyze the impact of the emissivity on the brightness temperatures. Tbs have been simulated for one month (August), over a large geographic area, and at all AMSU-A observation angles using (a) reliable emissivity estimations, (b) degraded land emissivities, and (c) using a constant emissivity value (0.95). The results have been analyzed by looking at the differences between Tbs observations and simulations. For the whole month and the entire geographic area, the global statistics are improved when using a reliable characterization of the emissivity with frequencies and scanning angles. At 31.4 GHz for example, the global statistics (mean/std) are: experiment (a) -0.73/4.45, experiment (b) -0.53/6.43, and experiment (c) -2.67/7.51.

The figure 10 shows the mean Tbs bias (observations-simulations) maps obtained at 23.8 GHz using the three emissivity calculation scenarios described above. The Tbs bias is reduced with the reliable emissivity scenario (subplot 10.a) whereas a constant (subplot 10.c) or degraded emissivity (subplot 10.b) could produce up to +/- 10 K of bias. These results confirm the impact of the emissivity estimate on the Tbs. Similar calculations could be performed with a degraded skin temperature with similar conclusions.

It is to be noted that in operational mode, the first step consists in a quality control that compares the simulated Tbs (using first guess information) and the measured Tbs. In a recent experiment at ECMWF, in close to operational conditions, a considerable amount of data in channels 5 and 6 passed the control tests

using a reliable emissivity estimates and channel 4 could be used as often as channel 5 and 6 whereas it was always rejected using the degraded emissivity estimates [Prigent *et al.*, 2004]. Using reliable emissivity estimate significantly increases the number of satellite observations that are assimilated in the system, making it possible then to use them.

Further sensitivity analysis to both skin temperature and emissivity estimates have to be performed in order to investigate their impact on temperature-humidity retrievals in both clear and cloudy situations, in the context of Neural Network inversion. This is the objective of our further work.

#### 4.2. IMPACT OF THE FIRST GUESS TEMPERATURE AND HUMIDITY PROFILES

The previous analysis shows that by using temperature and relative humidity first guess profiles (i.e., ECMWF profiles 6 hour before the target ECMWF profile, called FG-06) along with accurate surface skin temperature and emissivities, the surface effect on the AMSU measurements can be de-correlated from the atmospheric one leading to atmospheric temperature/humidity retrievals over land. In this section we examine the impact of the FG profiles choice on the NN retrievals. This is achieved by training NNs using the same AMSU dataset but with two different FG scenarios: First, using ECMWF profiles 24 hours before AMSU observations (called FG-24) and second, using the closest profile to the AMSU observation time but with additive noise (called FG-NOISE). The noise characteristics are those of the ECMWF model in 2000; these characteristics have been revised since. For specific humidity, the specification of the standard deviations is established using several statistics including radiosonde observations and it depends on the atmospheric situations [Rabier *et al.*, 1998]. On the contrary, temperature standard deviations only vary with latitude (i.e., different specifications for each 10° latitude range). The relative humidity noise is calculated for each ECMWF profile taking into account the temperature, specific humidity, and pressure. The temperature noise is calculated for ranges of latitudes over the studied area corresponding to (0-10°, 10°-20°, 30°-40°, 40°-50°, and 50°-60°). Figure 11 shows a temperature-humidity profile from our database (a, c) and the corresponding standard deviations for (b) temperature assuming different latitudes and (d) specific humidity using Rabier *et al.* [1998] method.

Figure 12 (a, b, c) presents the temperature and relative humidity NN results for the different FG scenarios: the RMS error profiles are plotted for the three FG configurations and for the corresponding NN retrievals. For temperature, the FG-24H is of less quality than the FG-06H, except for lower levels where the diurnal variability can be higher than the day-to-day changes. The FG-NOISE is always better than FG-06H and FG-24H with standard deviation of errors already close to 0.5 K for each vertical layer: Not surprisingly, in the FG-NOISE configuration, the use of AMSU satellite observations in the retrieval



scheme slightly improves the FG especially at high pressure levels; it can even degrade it in the lower levels. For our retrieval method, The FG-06H and FG-24H configurations appear more adequate and the retrieval at FG-06H has better statistics than the FG-24H. For relative humidity, all FG scenarios seem to be adequate for our retrieval algorithm, and in all cases the FG is improved by the NN retrieval. Best humidity retrievals are obtained using the FG-06H and FG-NOISE scenarios. From this set of experiments, it can be seen that retrieval results are highly dependent on the FG profiles choice. In our information content analysis, the temperature/humidity FG-06 scenario seems to be a good compromise: the obtained statistics are satisfactory for both temperature and humidity retrievals (especially at atmospheric low levels).

#### *4.3. RETRIEVAL METHOD EVALUATION WITH RADISONDE DATA*

Radiosonde observations provide independent and unique reference for temperature and humidity profiles that can be used for satellite retrieval validation. However, their use for such evaluation has some recognized limitations. For instance, they are unevenly distributed over the Earth with different measurement accuracy. They are particularly scarce in Africa. Measurements are performed at fixed times generally twice a day. They represent 1D information up to generally 100hPa whereas the satellite measures a large atmospheric volume, from the bottom to the top of the atmosphere and with the horizontal spatial extent related to the instrument field of view.

Records of radiosonde measurements are archived at many meteorological centers. For example, global radiosonde datasets from 1998 to 2004 are produced jointly by the National Climatic Data Center (NCDC: <http://www.ncdc.noaa.gov>) and the Forecast Systems Laboratory (FSL: <http://www.fsl.noaa.gov>). Radiosonde stations located within the studied geographic area (60°W-60°E and 60°S-60°N) and operational during January and August 2000 have been collocated in space and time with AMSU observations. Table 2 lists the selected radiosonde stations with their locations. These stations produce daily temperature and humidity profiles at 0 and at 12 UTC. During 2000, only the NOAA 15 satellite was operational with equator crossing at 7:30 a.m. and 19:30 p.m. As a consequence, there is at least 3 hours difference between the AMSU and selected radiosonde observation times.

Figure 13 shows the RMS error profiles obtained by comparing the FG and the NN retrieval with the collocated radiosonde measurement. As expected, the FG errors as compared to radiosondes are rather large, but we already commented in the beginning of this section on the limitations of radiosonde comparisons, in particular considering the large space and time differences in the collocation process. Since the FG RMS error profiles include large collocation errors, the detection of a relative improvement

is difficult. At surface level however, the RMS error is improved by about 2 K in temperature and 2.5% in humidity. This confirms that, when associated to careful design of retrieval technique, AMSU-A and -B observations can help retrieve low-level temperature and humidity profiles over land.

## Summary and Conclusions

This paper studied the feasibility of AMSU temperature and humidity profile retrieval over land, down to the surface. A neural network retrieval algorithm was developed, in which the AMSU satellite observations were combined with *a priori* surface skin temperature and surface emissivity, and with first guess information on the atmospheric profiles. The retrieval method has been applied over a large geographic area including mainly Africa but also Eastern South America, Southern Europe, and the Middle East (from 60°W to 60°E in longitudes and from 60°S to 60°N in latitudes). A very large number of atmospheric situations have been considered for our experiment, from a winter and a summer month. The NN retrievals over this large dataset is used as an information content analysis aiming at the evaluation of the potential of AMSU observations in improving low-level temperature and humidity profiles over land.

Results are encouraging: the RMS errors at surface level are within 2 K in temperature and 9% in relative humidity. A sensitivity study has been conducted to analyze the sensitivity of the retrieval algorithm with season, vegetation type, and scan angle: The NN method, when correctly trained on a large dataset and using the adequate surface emissivity and skin temperature description, is able to account for the large variability of the situations and to provide accurate atmospheric temperature and humidity profiles over land. We attempted to assess the quality of our retrieval approach by comparison with available radiosonde data. At surface level, the RMS errors are improved (by comparison with radiosonde profiles) by about 2 K in temperature and 2.5% in humidity in all cases. These results confirm that, when combined with reliable estimates of the land emissivity and the skin temperature, AMSU observations are a valuable source of information for the characterization of low-level temperature and humidity profiles over land. The natural continuation of this work will therefore involve the variational assimilation of such products in a NWP model.

Over Africa, the obtained AMSU derived profiles are of great interest because of the insufficient number of radiosonde stations in this continent. In a future work, additional radiosonde validation will be performed during a period when more NOAA satellites are operational: this should help improve the temporal collocation with the radiosonde measurements. The African Monsoon Multidisciplinary Analyses (AMMA) program could be a great opportunity for further radiosonde validation. This program

is an international effort to help understand the West African Monsoon and its implication from local to global scales regarding the physical, chemical, and biological environments. The so-called “extended operation period” of AMMA in 2005 – 2007 will be based on the densification of radiosonde and other local measurements over West Africa. A better collocation of radiosonde and AMSU observations will help assess the impact of AMSU measurements on temperature and humidity retrievals.

Once thoroughly validated, the extension of the algorithm to the globe will be investigated. A similar algorithm designed for cloudy scenes will also be developed, benefiting from the experience already acquired with the SSM/I instrument [Aires *et al.*, 2001].

### ACKNOWLEDGMENTS

THE AUTHORS WISH TO THANK FREDERIC CHEVALIER FOR HIS HELP AT DIFFERENT STAGES OF THIS WORK AND FOR VALUABLE DISCUSSIONS REGARDING AMSU INSTRUMENTS, ECMWF PRODUCTS AND NOISE CHARACTERISTICS. THEY ALSO APPRECIATE DISCUSSIONS WITH FUZHONG WENG REGARDING AMSU CALIBRATION. THE AUTHORS ARE VERY GRATEFUL TO CHRISTIAN MÄTZLER AND AN ANONYMOUS REVIWER FOR DETAILED AND HELPFUL COMMENTS ABOUT THE MANUSCRIPT. THEY WOULD LIKE TO THANK SOPHIE CLOCHE AND JEAN LOUIS MONGE FOR THEIR HELP TO ARCHIVE AND PROCESS THE ERA40 AND AMSU DATA. THE ISCCP DATA HAVE BEEN PROVIDED BY BILL ROSSOW, AMSU DATA VIA THE SAA AND ERA40 FROM ECMWF.

## REFERENCES

- Aires, F., C. Prigent, W. B. Rossow, and M. Rothstein, A new neural network approach including first guess for retrieval of atmospheric water vapor, cloud liquid water path, surface temperature, and emissivities over land from satellite microwave observations, *J. Geophys. Res.*, 106, 14,887-14,907, 2001.
- Dickinson, R. E., A. Henderson-Sellers, P.J. Kennedy, and M.F. Wilson, "Biosphere-atmosphere transfer scheme (BATS) for the NCAR community climate model," NCAR Technical Note NCAR/TN275+STR, Boulder, CO. 69 p, 1986.
- English, S., Estimation of temperature and humidity profile information from microwave radiances over different surface types, *J. Appl. Meteorol.*, vol. 38, pp. 1526-1541, 1999.
- Franquet, S., Contribution à l'étude du cycle hydrologique par radiométrie hyperfréquence: algorithmes de restitution (réseaux de neurones) et validation pour la vapeur d'eau (instruments AMSU, SAPHIR) et les précipitations (AMSU, Radarsat, Baltrad), *Thèse de doctorat de l'Université Paris-Diderot (Paris VII)*, 3 Mars 2003.
- Goldberg, M. D, D. S. Crosby, and L. Zhou, The limb adjustment of AMSU-A observations: Methodology and validation, *J. Appl. Meteor.*, 40, 70-83, 2001.
- Goodrum, G., K. B. Kidwell, and W. Winston, NOAA KLM user's guide, National Oceanic and Atmospheric Administration, 2000
- Grody, N. C., J. Zhao, R. Ferraro, F. Weng, and R. Boers, Determination of precipitable water and cloud liquid water over oceans from the NOAA-15 advanced microwave sounding unit, *J. Geophys. Res.*, 106, 2943-2954, 2001.
- Karbou, F., C. Prigent, L. Eymard, and J. Pardo, 2004, Microwave land emissivity calculations using AMSU-A and AMSU-B measurements, *IEEE Trans on Geoscience and Remote sensing*, TGRS-00185-2004, to be published.
- Kelly, G., and P. Bauer, The use of AMSU-A surface channels to obtain surface emissivity over land, snow and ice for Numerical Weather Prediction. *Proc. Of the Eleventh International TOVS study conference, Budapest, Hungary*, 167-179, 2000.
- Hewison, T., and R. W. Saunders, Measurements of the AMSU-B Antenna Pattern, *IEEE Trans. On Geoscience and Remote sensing*, V34, 2, 405-412, 1996.
- Matthews, E., Global vegetation and land use: new high resolution data bases for climate studies, *J. Clim. Appl. Meteorol.*, 22, 474-486, 1983.
- Mo, T., A study of the NOAA 16 AMSU-A brightness temperatures observed over Libyan Desert, *J. Geophys. Res.*, 107, ACL 16-1, 16-7, 2002.

Mo, T., AMSU-A Antenna Pattern corrections, *IEEE Trans. On Geoscience and Remote sensing*, V37, 1, 103-112, 1999.

Olson, J. S., J. A. Watts, and L. J. Allison, 1983: Carbon in live vegetation of major world ecosystems. US. Department of Energy, DOE/NBB--0037, No. TR004, U.S. Department of Energy, Washington, DC, 152 pp.

Pardo, J. R., J. Cernicharo, and E. Serabyn, Atmospheric Transmission at Microwave (ATM): an improved model for millimetre/submillimeter applications, *IEEE Trans. Ant and Prop*, vol. 49, NO. 12, pp. 1683-1694, 2001.

Prigent, C., W. B. Rossow, and E. Matthews, Microwave land surface emissivities estimated from SSM/I observations, *J. Geophys. Res.*, 102, 21867-21890, 1997.

Prigent, C., W. B. Rossow, and E. Matthews, Global maps of microwave land surface emissivities: Potential for land surface characterization, *Radio Sc.*, 33, 745-751, 1998.

Prigent, C. and W. B. Rossow, Retrieval of surface and atmospheric parameters over land from SSM/I: Potential and limitation, *Quat. J. Royal Meteor. Soc.*, 125, 2379-2400, 1999.

Prigent, C., J. -P. Wigneron, W. B. Rossow, and J. R. Pardo-Carrion, Frequency and angular variations of land surface microwave emissivities: Can we estimate SSM/T and AMSU emissivities from SSM/I emissivities?, *IEEE Trans. Geosc. Remote Sensing*, 38, 2373-2386, 2000.

Prigent, C., F. Chevallier, F. Karbou, P. Bauer, and G. Kelly, AMSU-A surface emissivities for the ECMWF assimilation, *J. Applied. Meteo.*, 2004, to be published.

*Proc. Of the thirteenth International TOVS study conference, Sainte-Adèle, Canada*, 18-29, 2003.

Rabier, F., A. McNally, E. Andersson, P. Courtier, P. Undén, J. Eyre, A. Hollingsworth, and F. Bouttier, The ECMWF implementation of three-dimensional variational assimilation (3D-Var). II Structure functions, *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 124, 1809-1829, 1998.

Rodgers, C. D., Characterization and error analysis of profiles retrieved from remote sounding measurements, *J. Geophys. Res.*, 95, 5587-5595, 1990.

Rosenkranz, P., Retrieval of temperature and moisture profiles from AMSU-A and AMSU-B measurements, *IEEE Trans. On Geoscience and Remote sensing*, 39, 2429-2435, 2001.

Rossow, W.B., and R. A. Schiffer, ISCCP cloud data products, *Bull. Am. Meteor. Soc.*, 72, pp. 2-20, 1991.

Rumelhart, D. E., G. E. Hinton, and R. J. Williams, Learning internal representations by error propagation, in *Parallel Distributed Processing: Explorations in the microstructure of cognition*, Vol. I, *Foundations*, edited by D.E. Rumelhart, J.L. McClelland, and the PDP Research group, pp. 318-362, MIT Press, Cambridge, Mass., 1986.

Shi, L., Retrieval of atmospheric temperature profiles from AMSU-A measurements using a neural network approach, *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 18, 340-347, 2001.

Simmons, A. J., and J.K. Gibson, the European Centre for Medium-Range Weather Forecasts: The ERA-40 Project Plan, 2000.

Wagner, D., E. Ruprecht, and C. Simmer, A combination of microwave observations from satellites and an EOF analysis to retrieve vertical humidity profiles over the ocean, *J. Appl. Meteor.*, 29, 1142-1157, 1990.

Weng, F., L. Zhao, R. Ferraro, G. Poe, X. Li, and N. Grody, Advanced Microwave Sounding Unit Cloud and Precipitation Algorithms, *Radio Sci.*, 38, 8,086-8,096, 2003.

Wilson, M. F., 1984: The construction and use of land surface information in a general circulation climate model. Unpublished Ph.D. thesis, University of Liverpool, United Kingdom, 346 pp.

Wilson, M. F., A. Henderson-Sellers, R. E. Dickinson, and P. J. Kennedy, 1987: Investigation of the sensitivity of the land-surface parameterization of the NCAR community climate model in region of tundra vegetation. *J. Climatol.*, 7, 319-343.

Wilson, M. F., A. Henderson-Sellers, R. E. Dickinson, and P. J. Kennedy, 1987: Sensitivity of the biosphere-atmosphere transfer scheme (BATS) to the inclusion of variable soil characteristics. *J. Clim Appl. Meteor.*, 26, 341-362.

Zhao, L., and F. Weng, Retrieval of ice cloud parameters using the Advanced Microwave Sounding Unit (AMSU), *J. Appl. Meteor.*, 41, 384-395, 2002.

**Table 1: AMSU-A and -B channel description**

| Channel No | Frequency (GHz)                     | Noise equivalent<br>(K) | Resolution at nadir<br>(km) |
|------------|-------------------------------------|-------------------------|-----------------------------|
| AMSU-A     |                                     |                         |                             |
| 1          | 23.8                                | 0.20                    | 48                          |
| 2          | 31.4                                | 0.27                    | 48                          |
| 3          | 50.3                                | 0.22                    | 48                          |
| 4          | 52.8                                | 0.15                    | 48                          |
| 5          | 53.596+/-0.115                      | 0.15                    | 48                          |
| 6          | 54.4                                | 0.13                    | 48                          |
| 7          | 54.9                                | 0.14                    | 48                          |
| 8          | 55.5                                | 0.14                    | 48                          |
| 9          | 57.290=f <sub>0</sub>               | 0.20                    | 48                          |
| 10         | f <sub>0</sub> +/- 0.217            | 0.22                    | 48                          |
| 11         | f <sub>0</sub> +/- 0.322 +/- 0.048  | 0.24                    | 48                          |
| 12         | f <sub>0</sub> +/- 0.322 +/- 0.022  | 0.35                    | 48                          |
| 13         | f <sub>0</sub> +/- 0.322 +/- 0.010  | 0.47                    | 48                          |
| 14         | f <sub>0</sub> +/- 0.322 +/- 0.0045 | 0.78                    | 48                          |
| 15         | 89                                  | 0.11                    | 48                          |
| AMSU-B     |                                     |                         |                             |
| 16         | 89                                  | 0.37                    | 16                          |
| 17         | 150                                 | 0.84                    | 16                          |
| 18         | 183.31 +/- 1                        | 1.06                    | 16                          |
| 19         | 183.31 +/- 3                        | 0.70                    | 16                          |
| 20         | 183.31 +/- 7                        | 0.60                    | 16                          |

**Table 2: Selected FSL/NCDC radiosonde stations**

| <b>WMO<br/>STATION<br/>NUMBER</b> | <b>LOCATION</b>    | <b>COUNTRY</b> | <b>LATITUDE<br/>(degree)</b> | <b>LONGITUDE<br/>(degree)</b> | <b>HEIGHT<br/>(m)</b> |
|-----------------------------------|--------------------|----------------|------------------------------|-------------------------------|-----------------------|
| 075100                            | BORDEAUX/MERIGNAC  | FRANCE         | 44.83                        | -0.70                         | 45                    |
| 076450                            | NIMES/COURBESSAC   | FRANCE         | 43.86                        | 04.40                         | 60                    |
| 080010                            | LA CORUNA          | SPAIN          | 43.36                        | -08.41                        | 67                    |
| 080230                            | SANTANDER          | SPAIN          | 43.46                        | -03.81                        | 79                    |
| 084300                            | MURCIA             | SPAIN          | 37.98                        | -01.11                        | 54                    |
| 084950                            | NORTH FRONT        | GIBRALTAR      | 36.15                        | -05.35                        | 3                     |
| 161440                            | S. PIETRO CAPOFUME | ITALY          | 44.65                        | 11.61                         | 38                    |
| 162450                            | PRATICA DI MARE    | ITALY          | 41.65                        | 12.43                         | 12                    |
| 166220                            | THESSALONIKI/MIKRA | GREECE         | 40.51                        | 22.96                         | 7                     |
| 167160                            | ATHENS/HELLENIKON  | GREECE         | 37.90                        | 23.73                         | 14                    |
| 170300                            | SAMSUN             | TUNISIA        | 41.28                        | 36.33                         | 44                    |
| 170620                            | ISTANBUL/GOZTEPE   | TUNISIA        | 40.96                        | 29.08                         | 40                    |
| 172200                            | IZMIR              | TUNISIA        | 38.43                        | 27.16                         | 25                    |
| 173510                            | ADANA/BOLGE        | TUNISIA        | 37.05                        | 35.35                         | 27                    |
| 401000                            | BEIRUT/KHALDE INTL | LEBANON        | 33.81                        | 35.48                         | 16                    |
| 401790                            | BET DAGAN          | ISRAEL         | 32.00                        | 34.81                         | 30                    |
| 410240                            | JEDDAH/ABDUL-AZIZ  | SAUDI ARABIA   | 21.66                        | 39.15                         | 20                    |
| 603900                            | ALGER/DAR EL BEIDA | ALGERIA        | 36.71                        | 03.25                         | 23                    |
| 607150                            | TUNIS CARTHAGE     | TUNISIA        | 36.83                        | 10.23                         | 5                     |
| 620100                            | TRIPOLI INTL       | LIBYA          | 32.90                        | 13.28                         | 80                    |
| 620530                            | BENINA             | LIBYA          | 32.08                        | 20.26                         | 39                    |
| 623060                            | MERSA MATRUH       | EGYPT          | 31.33                        | 27.21                         | 28                    |
| 623370                            | EL ARISH           | EGYPT          | 31.08                        | 33.75                         | 32                    |
| 623780                            | HELWAN             | EGYPT          | 29.86                        | 31.33                         | 139                   |
| 649100                            | DOUALA OBS.        | CAMEROON       | 04.01                        | 09.70                         | 10                    |
| 655780                            | ABIDJAN/PORT BOUET | IVORY COAST    | 05.25                        | -03.93                        | 6                     |
| 685880                            | DURBAN/LOUIS BOTHA | SOUTH AFRICA   | -29.96                       | 30.95                         | 8                     |



|  |     |
|--|-----|
| FIGURE 1: AMSU-A AND -B WEIGHTING FUNCTIONS FOR A US STANDARD TROPICAL ATMOSPHERE ( $WV = 42 \text{ kg/m}^2$ ) AT NADIR, ASSUMING A SURFACE TEMPERATURE OF 299 K AND A SURFACE EMISSIVITY OF 0.95 FOR: (A) AMSU-A1 (B) AMSU-A2, AND (C) AMSU-B CHANNELS. _____                                   | 112 |
| FIGURE 2: MEAN AMSU OBSERVED BRIGHTNESS TEMPERATURES FOR JANUARY AND AUGUST 2000 WITH RESPECT TO THE ZENITH ANGLE AND 2 SURFACE TYPES (DESERT AND DENSE VEGETATION) _____  | 113 |
| FIGURE 3: MONTHLY MEAN AMSU EMISSIVITIES AT 31.4 GHz FOR 6 MONTHS OF DATA FROM YEAR 2000 WITH RESPECT TO 30 OBSERVATION ANGLES AND OVER A DESERT SURFACE. _____  | 114 |
| FIGURE 4: A SCHEMATIC REPRESENTATION OF THE NEURAL NETWORK SCHEME. _____   | 115 |
| FIGURE 5: RMS ERROR PROFILES FOR THE ENTIRE DATABASE (JANUARY AND AUGUST) FOR (A) TEMPERATURE, AND (B) RELATIVE HUMIDITY. DASHED LINES ARE FOR THE FIRST GUESS (FG) ERROR PROFILES AND SOLID LINES ARE FOR THE NEURAL NETWORK (NN) RETRIEVAL ERROR PROFILES. _____                               | 116 |
| FIGURE 6: (A) FG RMS ERROR MAPS AT 1000 hPa LEVEL FOR ALL DATA AND FOR RELATIVE HUMIDITY (%), (B) NN RMS ERROR MAPS AT 1000 hPa LEVEL FOR ALL DATA AND FOR RELATIVE HUMIDITY (%), (C) SAME AS (A) BUT FOR TEMPERATURE (K), AND (D) SAME AS (B) BUT FOR TEMPERATURE (K). _____                    | 117 |
| FIGURE 7: (A) TEMPERATURE AND HUMIDITY RMS ERROR PROFILES FOR NADIR SITUATIONS; BOTH FG AND NN ERROR PROFILES ARE SHOWN, (B) SAME AS (A) BUT AT 58° ZENITH ANGLE (C) NN RMS ERRORS AT 1000 hPa LEVEL FOR BOTH TEMPERATURE AND HUMIDITY SORTED BY AMSU ZENITH ANGLE. _____                        | 118 |
| FIGURE 8: RMS ERROR PROFILES OBTAINED FOR BOTH TEMPERATURE AND HUMIDITY (FG AND NN PROFILES) FOR (A) DATA FROM JANUARY OVER DESERT, (B) DATA FROM AUGUST OVER DESERT, (C) DATA FROM JANUARY OVER DENSE VEGETATION, AND (D) DATA FROM AUGUST OVER DENSE VEGETATION. _____                         | 119 |
| FIGURE 9: TEMPERATURE RMS ERROR (K) AND RELATIVE HUMIDITY RMS ERROR (%) PROFILES FOR NADIR SITUATIONS (JANUARY AND AUGUST) OBTAINED FOR (A) DESERT AND (B) DENSE VEGETATION. _____   | 120 |
| FIGURE 10 : MEAN TBS BIAS (OBSERVATIONS-SIMULATIONS) MAPS OBTAINED WITH AUGUST 2000 DATA, AT 23.8 GHz, AND USING (A) A RELIABLE EMISSIVITY ESTIMATION, (B) A DEGRADED EMISSIVITY DATASET, AND (C) AN EMISSIVITY EQUAL TO 0.95 _____  | 121 |
| FIGURE 11 : SAMPLE TEMPERATURE-HUMIDITY PROFILE FROM THE STUDY DATABASE (A, C) AND THE CORRESPONDING STANDARD DEVIATIONS FOR (B) TEMPERATURE ASSUMING DIFFERENT LATITUDE RANGES, AND (D) FOR SPECIFIC HUMIDITY. _____  | 122 |
| FIGURE 12: THE RMS ERROR PROFILES OBTAINED FOR THE ENTIRE DATABASE USING DIFFERENT ECMWF FG PROFILES SCENARIOS FOR TEMPERATURE AND RELATIVE HUMIDITY. _____  | 123 |
| FIGURE 13: RMS ERROR PROFILES OBTAINED BY COMPARISON TO RADIOSONDE MEASUREMENTS FOR (A) TEMPERATURE (DASHED LINE FOR THE FG AND SOLID LINE FOR THE NN RETRIEVAL) AND (B) SAME AS (A) BUT FOR RELATIVE HUMIDITY. THE NUMBER OF RADIOSONDE MEASUREMENTS IS ALSO INDICATED ON THE RIGHT AXIS. _____ | 124 |

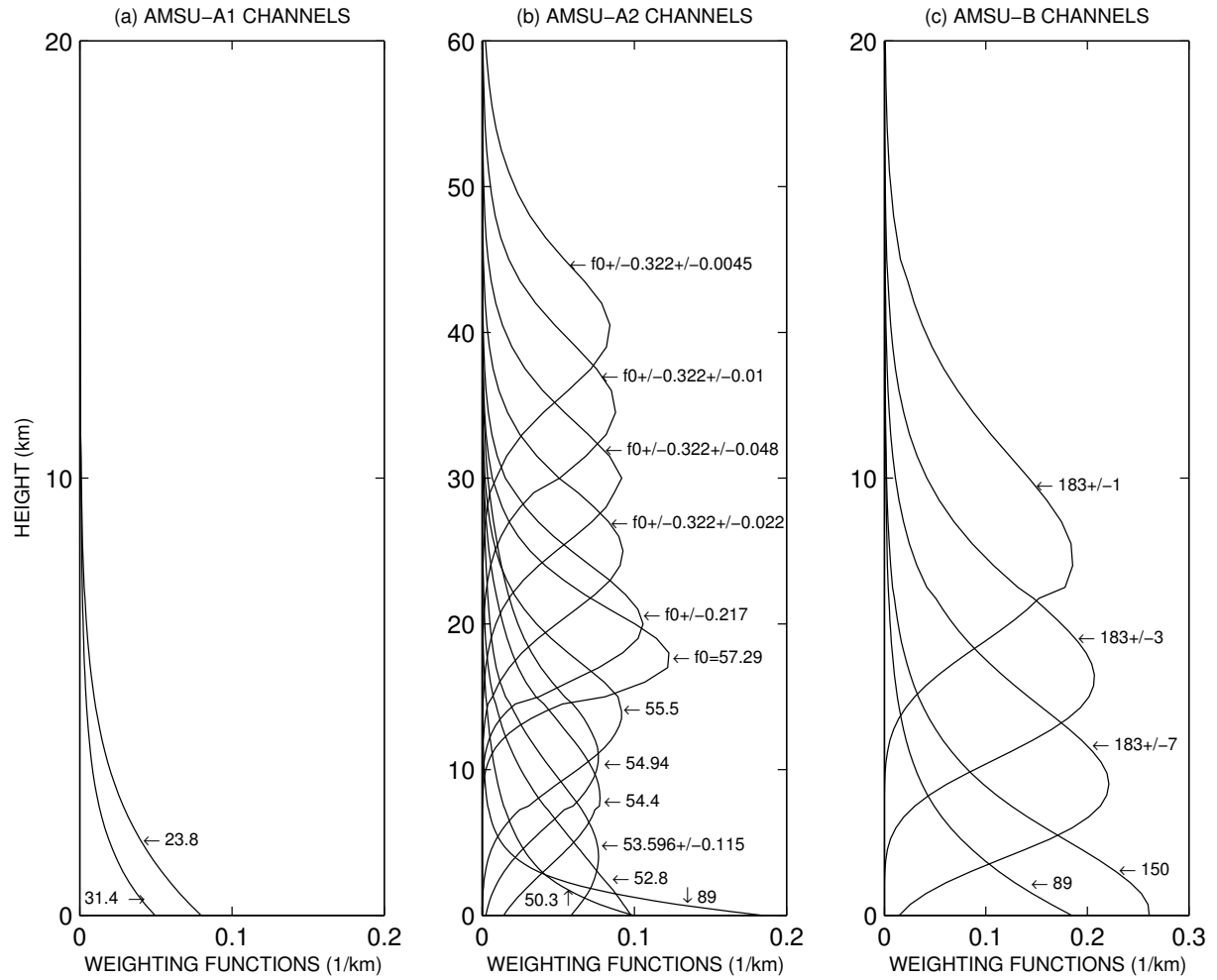


Figure 1: AMSU-A and -B weighting functions for a US standard tropical atmosphere ( $WV = 42 \text{ kg/m}^2$ ) at nadir, assuming a surface temperature of 299 K and a surface emissivity of 0.95 for: (a) AMSU-A1 (b) AMSU-A2, and (c) AMSU-B channels.

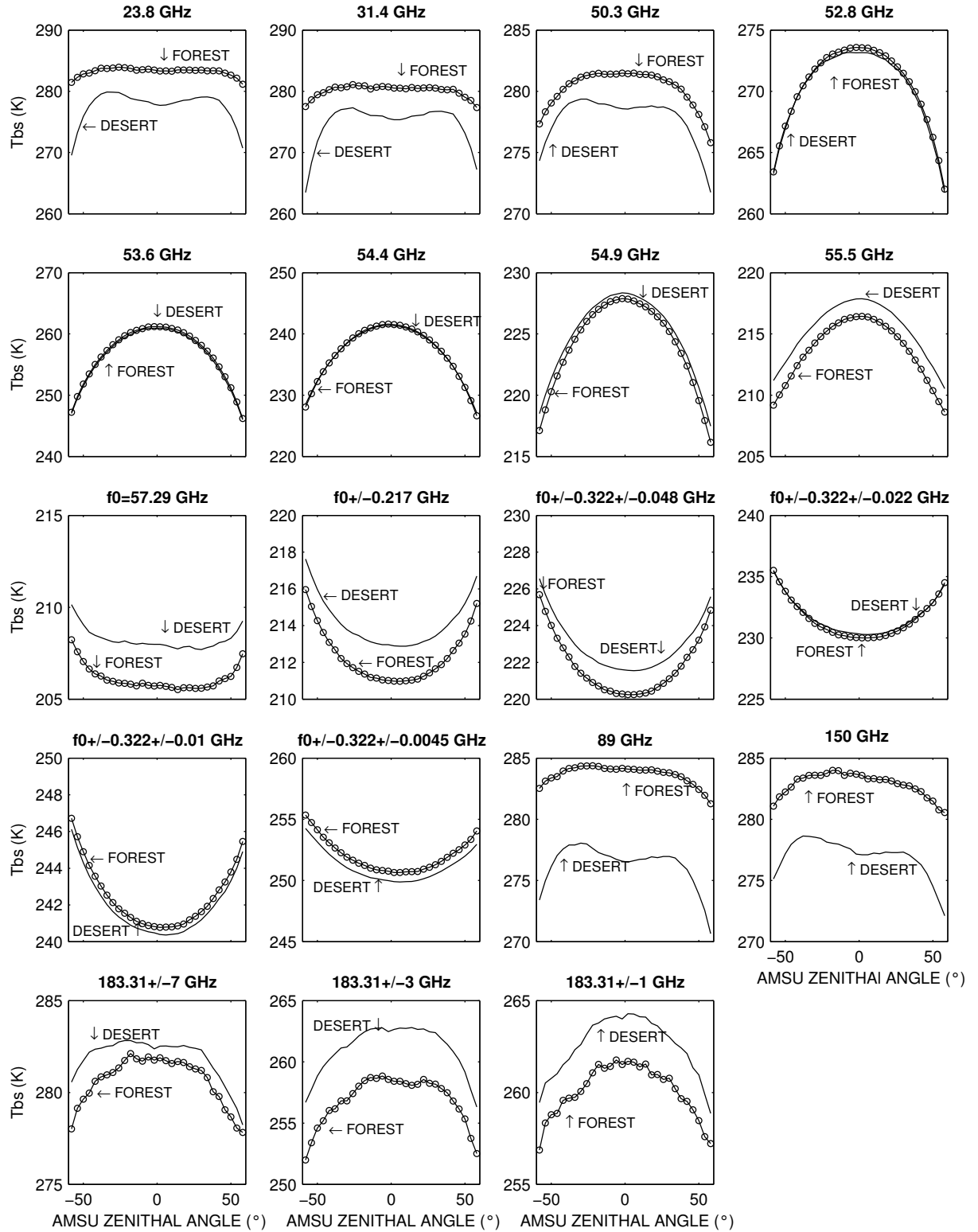


Figure 2: Mean AMSU observed brightness temperatures for January and August 2000 with respect to the zenith angle and 2 surface types (desert and dense vegetation)

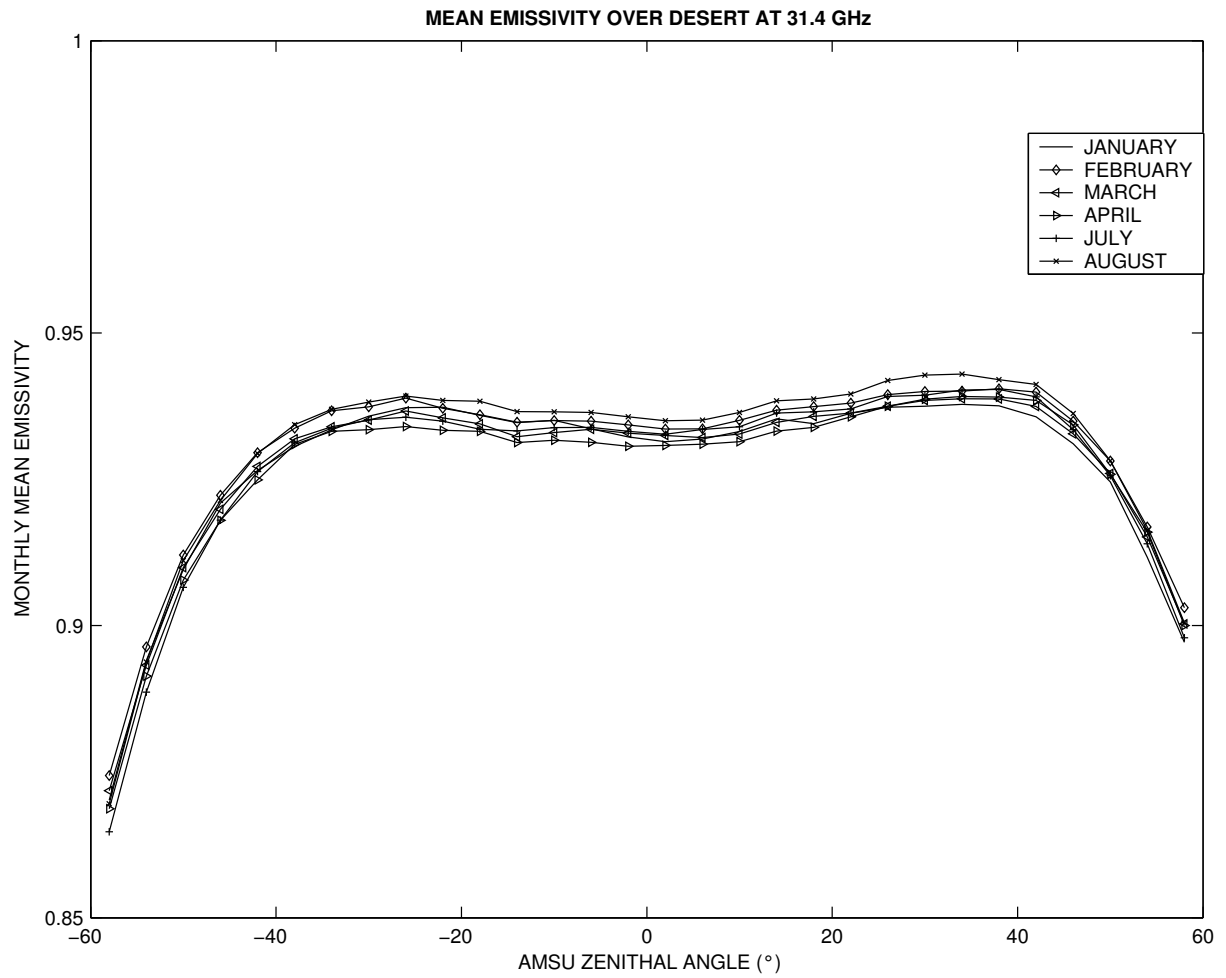


Figure 3: Monthly mean AMSU emissivities at 31.4 GHz for 6 months of data from year 2000 with respect to 30 observation angles and over a desert surface.

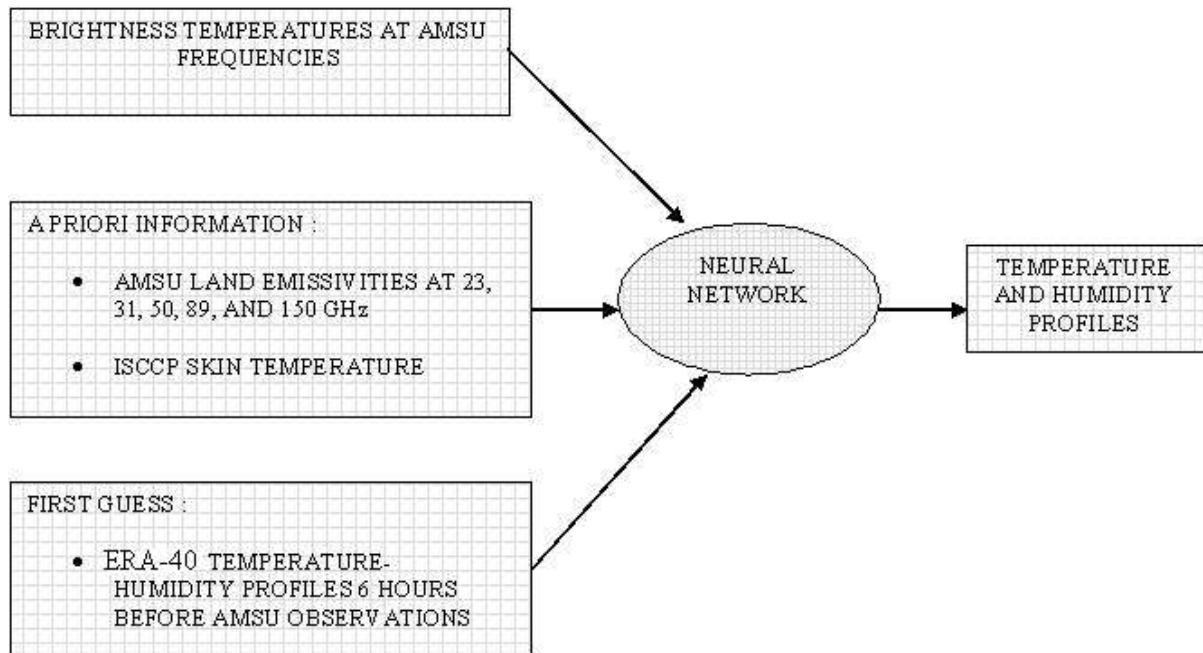


Figure 4: A schematic representation of the neural network scheme.

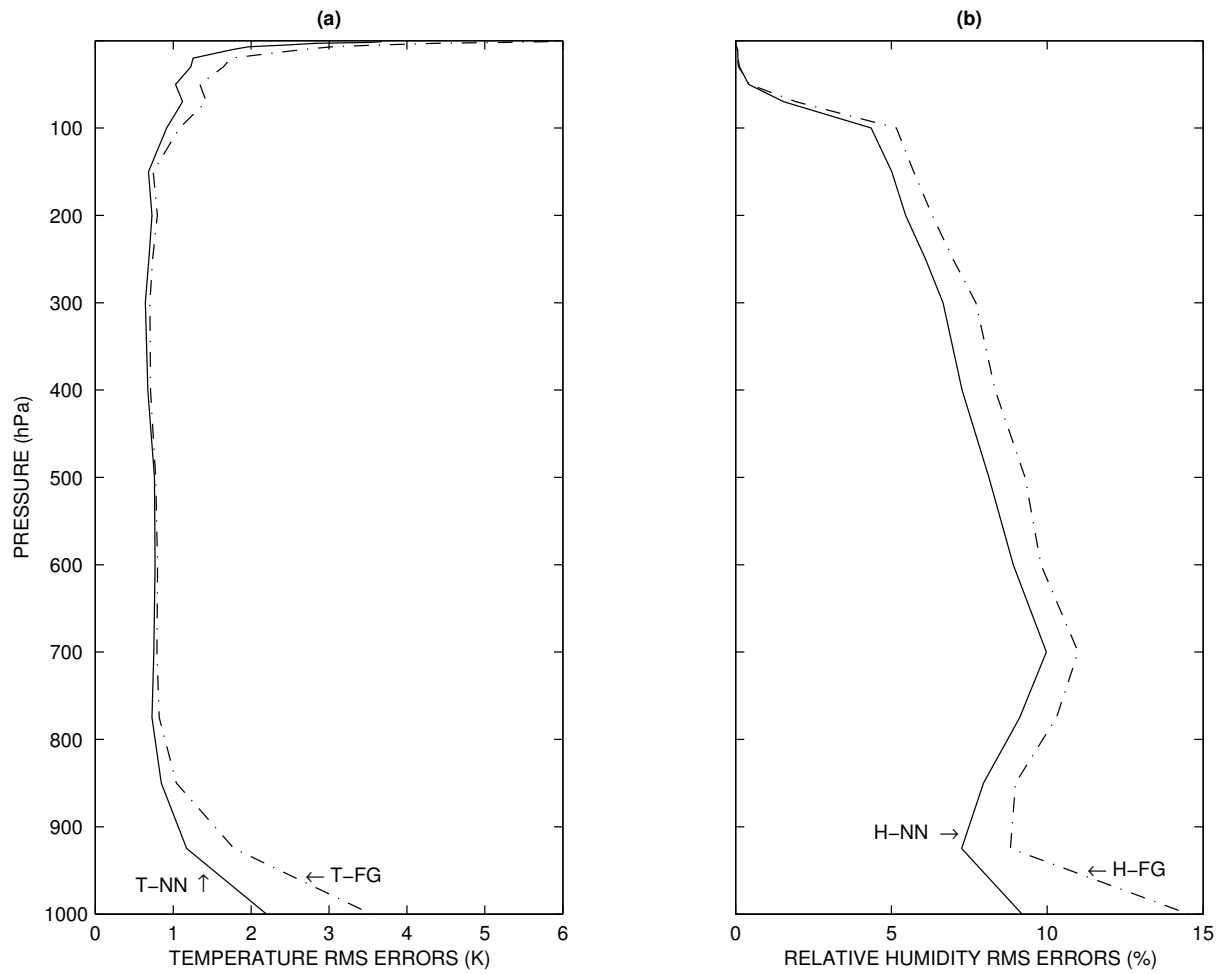


Figure 5: RMS error profiles for the entire database (January and August) for (a) temperature, and (b) relative humidity. Dashed lines are for the First Guess (FG) error profiles and solid lines are for the Neural Network (NN) retrieval error profiles.

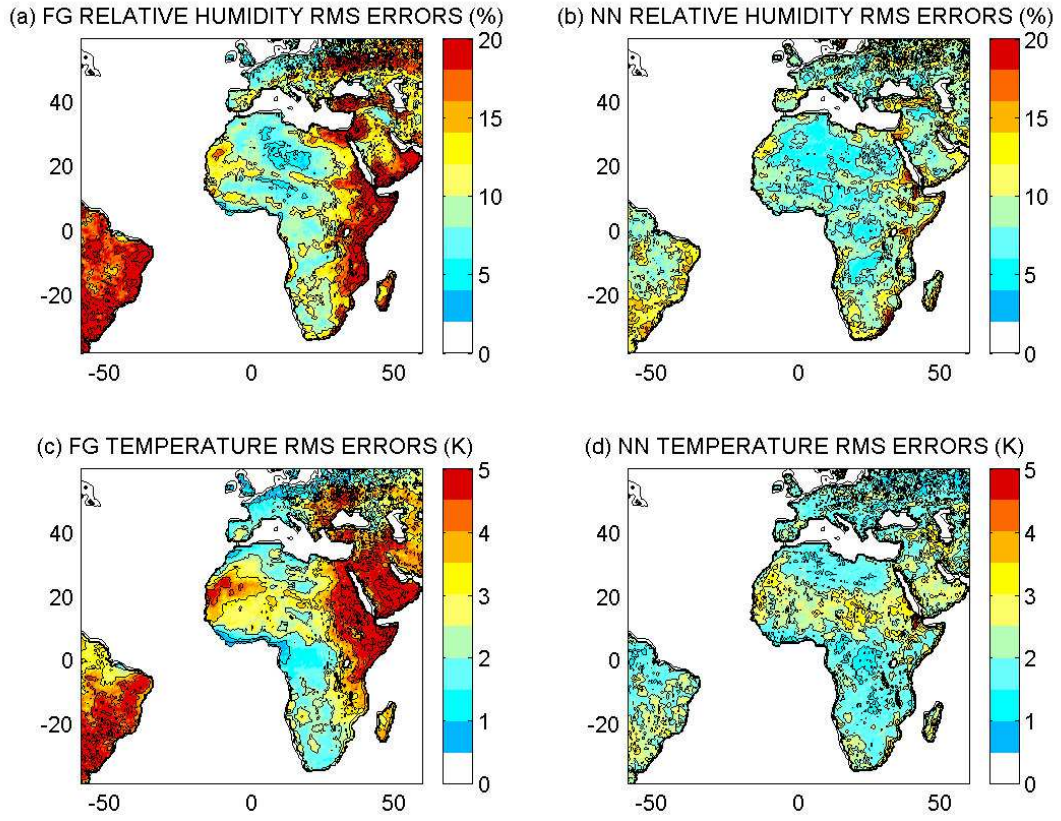


Figure 6: (a) FG RMS error maps at 1000 hPa level for all data and for relative humidity (%) (b) NN RMS error maps at 1000 hPa level for all data and for relative humidity (%) , (c) same as (a) but for temperature (K), and (d) same as (b) but for temperature (K).

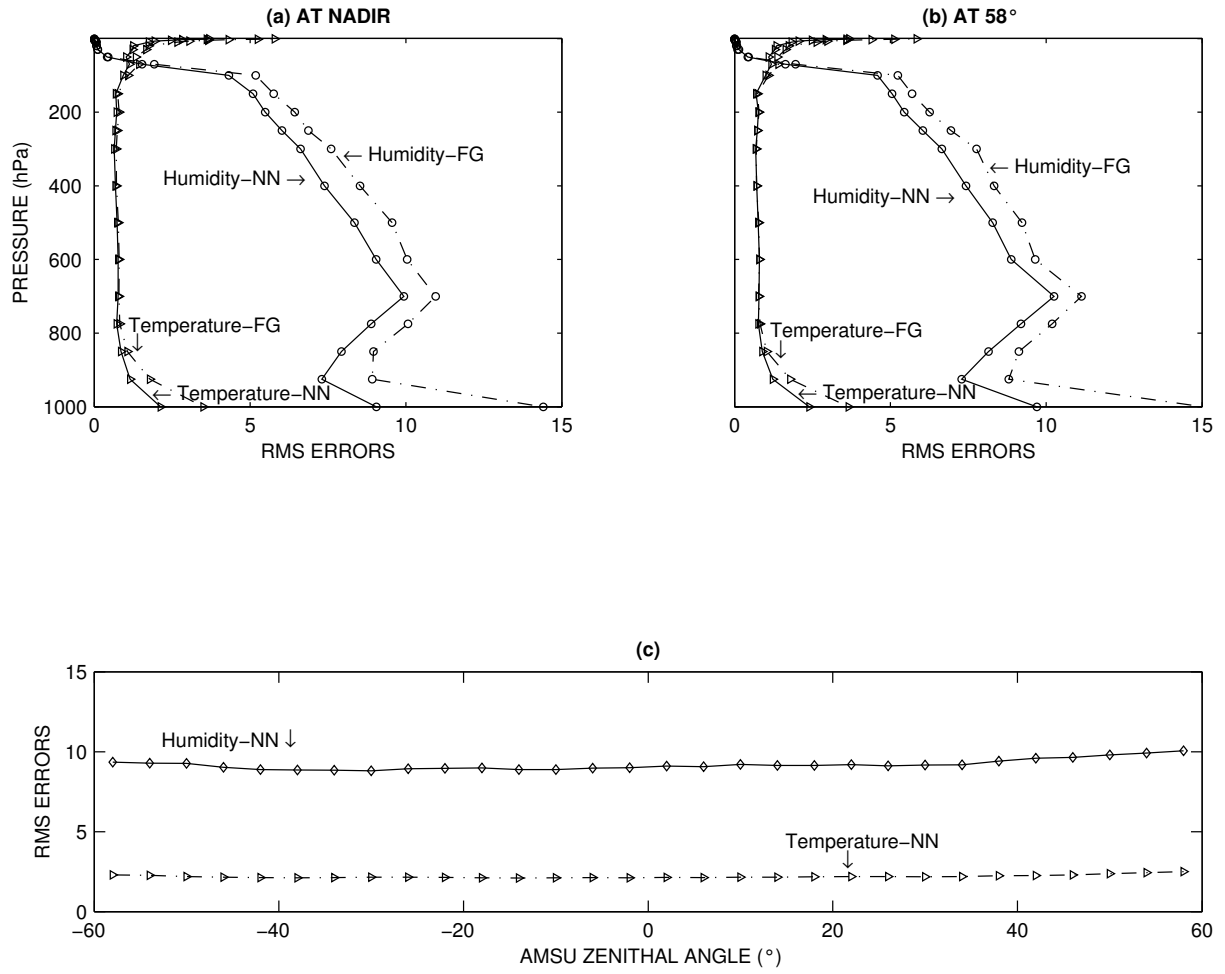


Figure 7: (a) Temperature and humidity RMS error profiles for nadir situations; both FG and NN error profiles are shown, (b) same as (a) but at 58° zenith angle (c) NN RMS errors at 1000 hPa level for both temperature and humidity sorted by AMSU zenith angle.



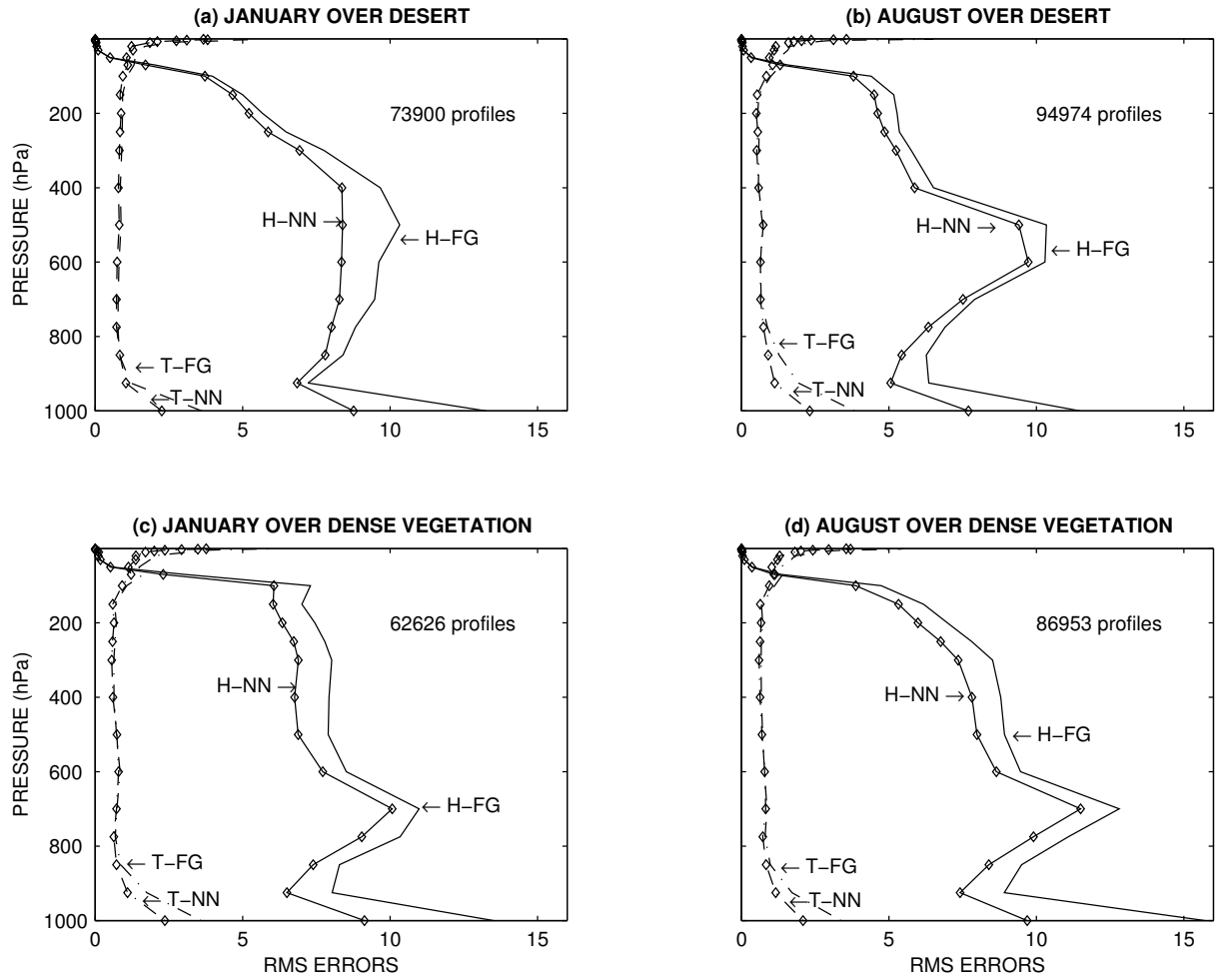


Figure 8: RMS error profiles obtained for both temperature and humidity (FG and NN profiles) for (a) data from January over desert, (b) data from August over desert, (c) data from January over dense vegetation, and (d) data from August over dense vegetation.

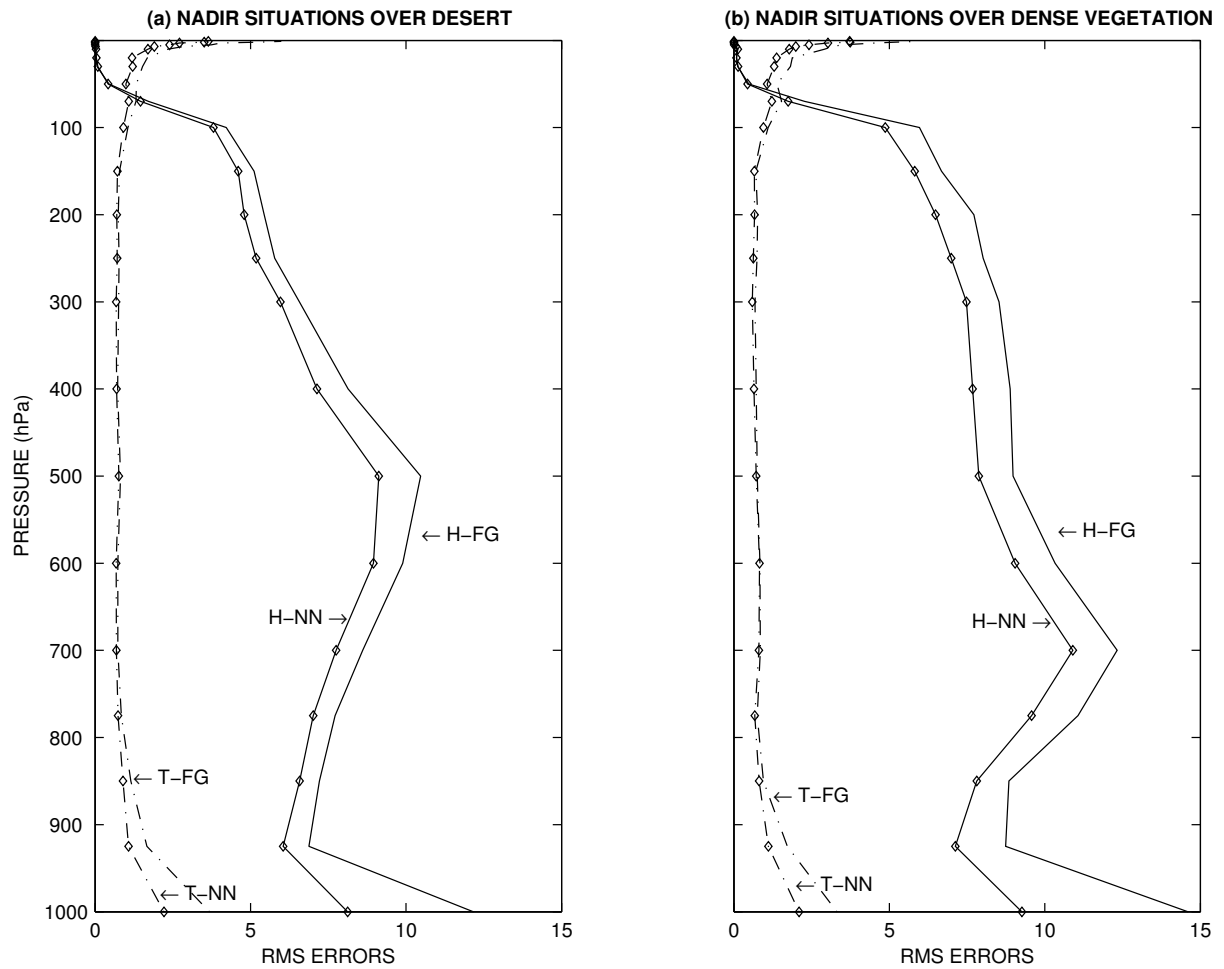


Figure 9: Temperature RMS error (K) and relative humidity RMS error (%) profiles for nadir situations (January and August) obtained for (a) desert and (b) dense vegetation.

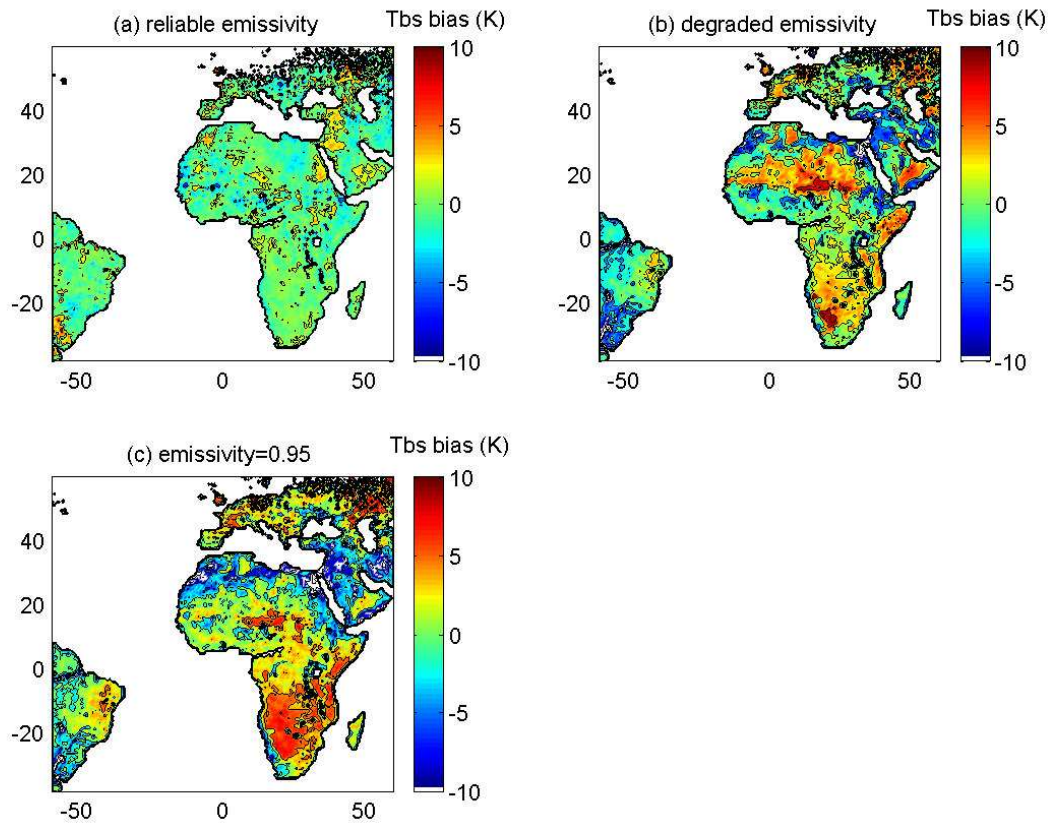


Figure 10 : Mean Tbs bias (observations-simulations) maps obtained with August 2000 data, at 23.8 GHz , and using (a) a reliable emissivity estimation, (b) a degraded emissivity dataset, and (c) an emissivity equal to 0.95

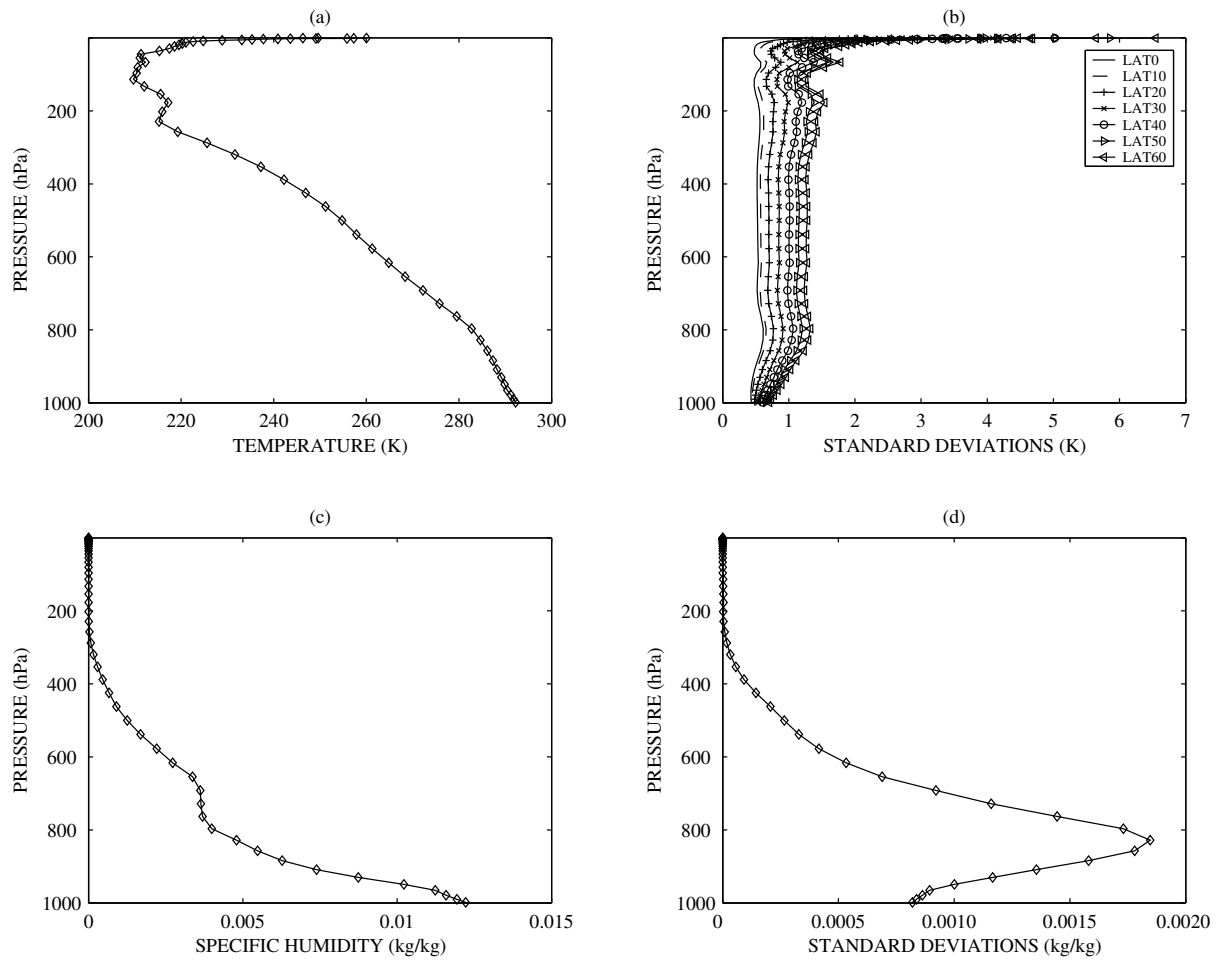


Figure 11 : Sample temperature-humidity profile from the study database (a, c) and the corresponding standard deviations for (b) temperature assuming different latitude ranges, and (d) for specific humidity.

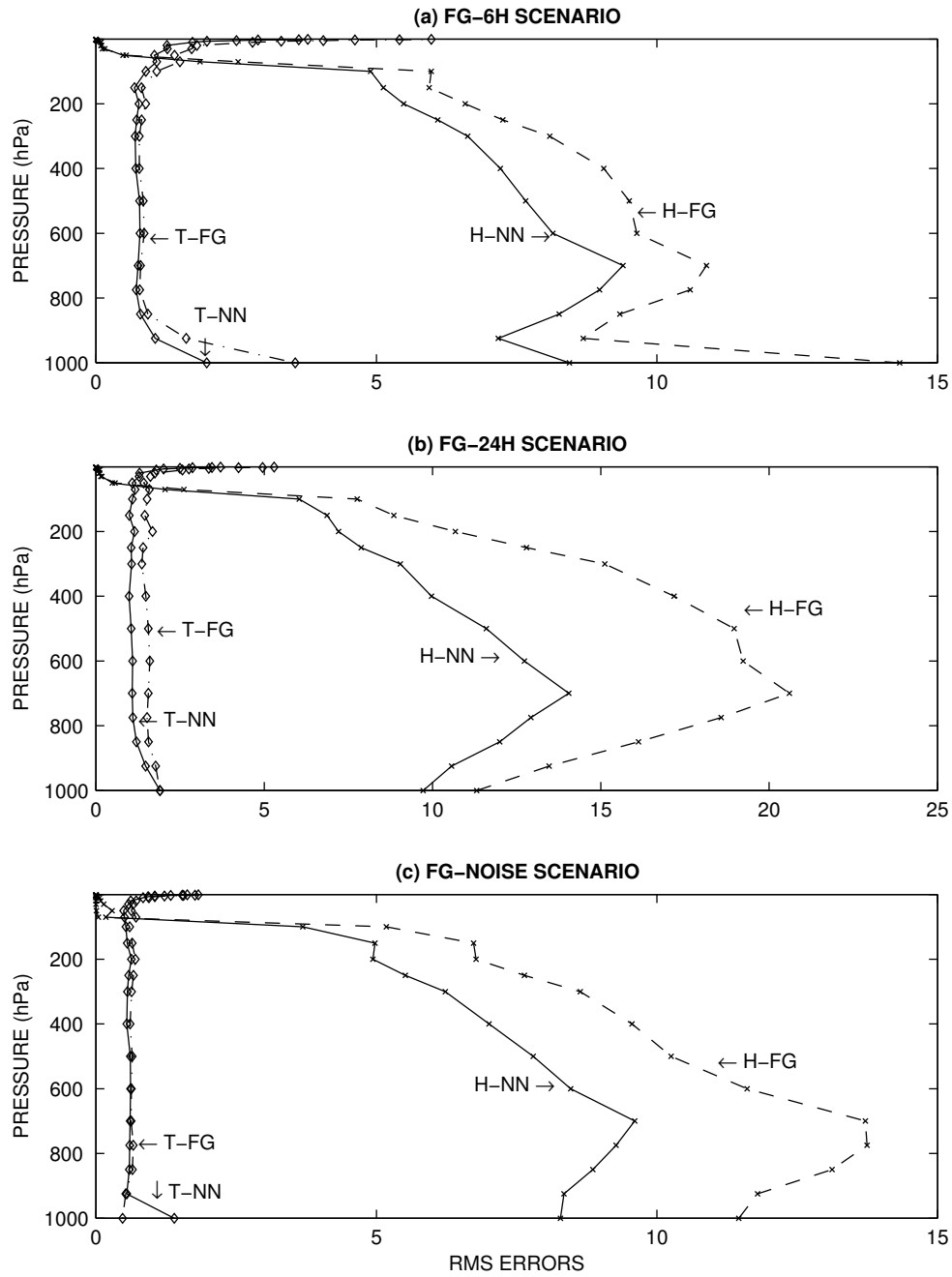


Figure 12: The RMS error profiles obtained for the entire database using different ECMWF FG profiles scenarios for temperature and relative humidity.

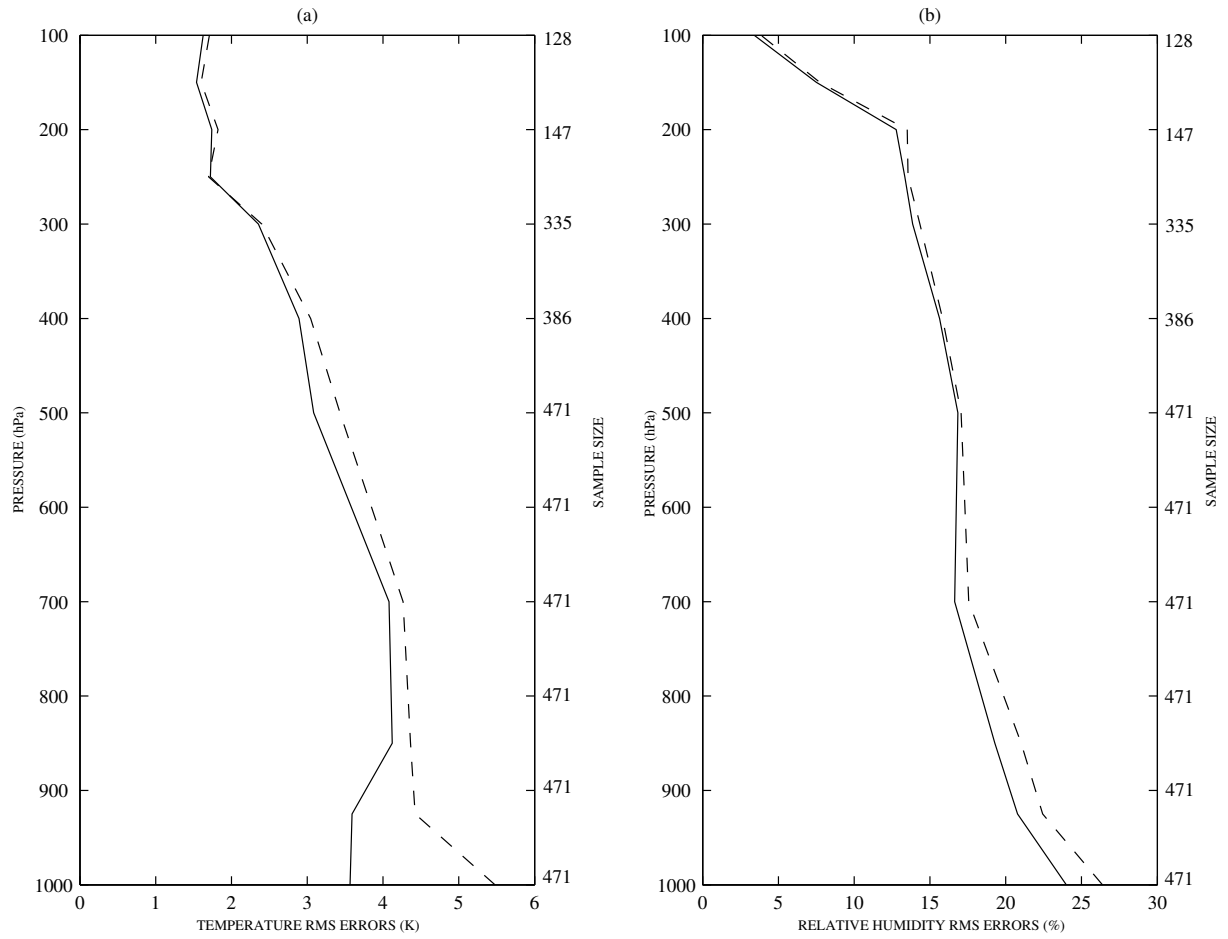


Figure 13: RMS error profiles obtained by comparison to radiosonde measurements for (a) temperature (dashed line for the FG and solid line for the NN retrieval) and (b) same as (a) but for relative humidity. The number of radiosonde measurements is also indicated on the right axis.

---

## CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

---

|          |   |            |
|----------|---|------------|
| <b>7</b> | <b>CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES</b>  | <b>126</b> |
| 7.1.     | Rappel des objectifs  | 126        |
| 7.2.     | Les contributions de la thèse   | 127        |
| 7.2.1.   | <i>L'émissivité de surface</i>  | 127        |
| 7.2.2.   | <i>Paramétrisation de l'émissivité de surface</i>   | 128        |
| 7.2.3.   | <i>Profils atmosphériques de température et d'humidité à partir des observations AMSU-A et – B au-dessus des continents</i> | 129        |
| 7.3.     | Perspectives  | 129        |
| 7.3.1.   | <i>Assimilation des observations AMSU au-dessus des continents</i>  | 129        |
| 7.3.2.   | <i>Biais instrumentaux AMSU</i>   | 131        |
| 7.3.3.   | <i>Le Sondeur SAPHIR à bord de MAGHATROPIQUES</i>   | 131        |
| 7.3.4.   | <i>L'émissivité de surface : potentiel pour l'étalonnage des capteurs micro onde ?</i>                                      | 133        |
| 7.3.5.   | <i>Variation saisonnière de l'émissivité de surface : potentiel dans le cadre du programme AMMA ?</i>                       | 135        |

---

## 7 CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

---

### 7.1. Rappel des objectifs

L'objectif premier de ce travail de thèse est d'étudier le potentiel et la faisabilité de l'inversion des mesures des sondeurs micro onde, et tout particulièrement des mesures AMSU-A et -B, au-dessus des surfaces continentales.

En effet, si les mesures hyperfréquences sont de plus en plus exploitées au-dessus des océans, elles restent insuffisamment utilisées au-dessus des continents. Jusqu'à maintenant, uniquement les canaux non sensibles à la surface terrestre sont assimilés limitant ainsi le potentiel de sondage des instruments micro onde aux couches atmosphériques les plus élevées. Avec une émissivité élevée des continents, la distinction entre les contributions relatives de la surface et de l'atmosphère au signal mesuré par le satellite est assez difficile. En plus, l'émissivité des surfaces continentales varie de façon complexe en temps et en espace; elle dépend de la rugosité de la surface, de l'humidité au sol, et du couvert végétal entre autres paramètres. Pour cela, une part importante de ce travail a été dédiée à l'estimation de l'émissivité de surface aux fréquences des canaux surface et aux conditions d'observation des instruments AMSU-A et AMSU-B.



Le calcul de l'émissivité de surface a été réalisé sur tout le globe à partir des observations non nuageuses AMSU-A et -B de l'année 2000. L'identification des nuages a été effectuée en utilisant les données satellitaires auxiliaires (ISCCP). Le calcul de l'émissivité de surface concerne les fréquences sensibles à la surface allant de 23 à 150 GHz et 30 positions d'angle d'observation (de  $-58^\circ$  à  $+58^\circ$  par rapport au nadir).

Les émissivités AMSU ainsi obtenues ont été analysées en examinant leurs dépendances angulaires et spectrales et en les comparant aux émissivités SSM/I. Ceci nous a permis de proposer une paramétrisation simple de l'émissivité de surface valable aux fréquences allant de 23 à 150 GHz et aux angles d'observations variant de  $-58^\circ$  à  $+58^\circ$  par rapport au nadir.

Par la suite et connaissant l'émissivité de surface, il a été possible de développer une technique de restitution des profils de température et d'humidité pour pleinement exploiter les données AMSU au-dessus des continents. Dans cette optique, la faisabilité de l'inversion des mesures AMSU au-dessus des continents a été étudiée en vue de la restitution des profils de température et d'humidité. Il s'agissait donc d'évaluer le contenu en information des mesures AMSU au-dessus des terres quand elles sont combinées à des données auxiliaires décrivant la surface (émissivité et température de surface).

## 7.2. Les contributions de la thèse

Les résultats principaux de ce travail de thèse sont sommairement présentés.

### 3.1.1. *L'émissivité de surface*

Des cartes mensuelles d'émissivité de surface sont disponibles et sont compatibles avec les fréquences, le mode d'observation et la polarisation des instruments AMSU-A et AMSU-B. Ces émissivités ont été obtenues aux fréquences de 23.8, 31.4, 50.3, 89, et 150 GHz, pour tous les angles d'observations AMSU-A (30 valeurs d'angle d'observations de  $-58^\circ$  à  $58^\circ$  par rapport au nadir) en enlevant la contribution de l'atmosphère, des nuages, et de la pluie. Les données satellitaires auxiliaires ISCCP sont utilisées pour identifier des observations non nuageuses AMSU et pour fournir une estimation précise et indépendante de la température de surface. Les profils de température et d'humidité ERA-40 de l'ECMWF nous ont permis de calculer la contribution de l'atmosphère aux mesures satellitaires par transfert radiatif.

A partir de l'ensemble de la base de données des émissivités, plusieurs études ont été menées pour caractériser la variation en angle et en fréquence de l'émissivité de surface.

La dépendance angulaire de l'émissivité est forte au-dessus des zones de sol nu comme les déserts et assez limitée au-dessus des zones à végétation dense. En plus, cette étude a permis l'identification d'une dissymétrie de balayage des instruments AMSU du satellite NOAA15 probablement due à un problème instrumental. La dissymétrie est plus forte à 31.4 GHz et au-dessus des zones à émissivité faible comme le désert. Dans ce cas là, la dissymétrie peut atteindre 3% ce qui représente ~9 K en température de brillance.

L'émissivité de surface AMSU varie peu en fréquence (de 23 GHz à 150 GHz). Ceci nous a permis de réaliser l'extrapolation de l'émissivité de surface aux fréquences moins sensibles à la surface et pour lesquelles le calcul de l'émissivité est difficile. C'est le cas par exemple des fréquences à 52, 53, et 183.31+/-7 GHz pour lesquelles la transmission atmosphérique est assez faible (moins de 20%).

#### 7.2.2. *Paramétrisation de l'émissivité de surface*

L'analyse des émissivité de surface issues des observations AMSU a permis l'élaboration d'une paramétrisation de l'émissivité aux fréquences et aux angles d'observation du sondeur micro onde. Ce travail est motivé par le besoin d'exploiter de façon simple et globale les données AMSU ou issues de sondeurs similaires au-dessus des continents pour extraire l'information sur les basses couches atmosphériques et sur la surface. L'usage direct des émissivités AMSU déjà calculées est possible pour de telles applications. Cependant, il est nécessaire de prendre en compte la dépendance angulaire de l'émissivité particulièrement importante au-dessus de sol nu. De plus, il est difficile de produire des cartes d'émissivité moyenne à tous les angles d'observations AMSU vu le nombre limité d'observation pour chaque position de balayage. La paramétrisation de l'émissivité de surface a été construite avec un mois d'observation AMSU ; elle est valable pour les fréquences allant de 23 à 150 GHz et des angles d'observations allant de -58° à +58° par rapport au nadir. Elle a été évaluée en comparant les émissivités simulées aux émissivités directement calculées à partir des observations satellitaires. Des comparaisons de températures de brillance simulées et mesurées sur continents ont également été effectuées. Toutes ces comparaisons ont montré le potentiel de la paramétrisation de l'émissivité pour estimer la contribution de la surface aux signaux mesurés par le satellite. Par conséquent, elle constitue un outil potentiel en vue de l'assimilation des mesures AMSU ou issues de sondeurs du même type sur les terres.

### *7.2.3. Profils atmosphériques de température et d'humidité à partir des observations AMSU-A et -B au-dessus des continents*

Une analyse du contenu en information des observations issues des instruments AMSU au-dessus des continents quand elles sont combinées à des données auxiliaires de surface (émissivité et température de surface) a été réalisée. Cette analyse est basée sur une approche statistique neuronale (NN), avec l'utilisation de profils de température et d'humidité atmosphériques, a priori issues des réanalyses ERA-40. Les réanalyses sont utilisées comme « vérité » pour évaluer les performances de la méthode restitution pour laquelle diverses ébauches ont été testées. La méthode a été appliquée sur une grande base de données incluant diverses situations de surface et d'atmosphère. L'étude a montré qu'avec une bonne estimation de l'émissivité et de la température de surface et en utilisant des profils a priori pris 6h avant l'heure d'observations AMSU, la restitution de la température et l'humidité pourrait être réalisée au dessus des continents avec une meilleure précision. L'erreur quadratique moyenne obtenue avec la restitution neuronale est de 2 K en température et de 9 % en humidité relative au niveau le plus proche de la surface. Les profils atmosphériques fournis par la méthode de restitution neuronale ont été confrontés aux profils de radiosondages. Cette comparaison a confirmé l'intérêt potentiel des données AMSU quand elles sont combinées à l'émissivité et à la température de surface, pour le sondage de température et d'humidité atmosphériques.

## 7.3. Perspectives

### *7.3.1. Assimilation des observations AMSU au-dessus des continents*

Contrairement aux mesures dans le visible et l'infrarouge, les observations micro-onde traversent les cirrus et les nuages non précipitants. Elles ont un rôle décisif à jouer dans un modèle de prévision numérique global comme ARPEGE ou celui de l'ECMWF, mais également dans les modèles à aire limitée comme ALADIN ou encore son successeur AROME à méso échelle qui devrait être opérationnel à Météo France en 2008.

La continuité naturelle du travail de thèse est de réaliser l'assimilation sur Terre dans un modèle de prévision du temps des données basses fréquences AMSU ou issues d'autres sondeurs ou imageurs micro onde, en profitant d'une meilleure connaissance de l'émissivité de surface. La faisabilité et l'intérêt de

l'inversion des profils atmosphériques de température et d'humidité au-dessus de surfaces continentales et à partir des observations AMSU ont été tous deux démontrés.

L'assimilation des données micro onde au dessus des continents, sera effectuée au sein du Centre National de Recherches Météorologiques (CNRM) à Météo France avec le soutien du Centre National de Recherches Spatiales (CNES). Pour atteindre cet objectif, plusieurs étapes doivent être franchies :

- ❖ Tenir compte des contraintes du contexte « temps réel ». La variabilité de l'émissivité de surface selon les diverses résolutions du modèle de prévision (de quelques km à quelques dizaines de km) doit être étudiée. L'effet de la pluie ou de la neige sur les émissivités doit être également pris en compte ainsi que la variabilité spatio-temporelle de l'émissivité avec la végétation, les nappes d'eau ou humidité du sol. En particulier, il serait judicieux de confronter les émissivités micro-ondes AMSU à diverses échelles spatiales (en affinant la résolution) avec d'autres produits issus de données micro-ondes, visibles ou infrarouges.
- ❖ Assimilation des radiances des instruments AMSU-A et -B et d'autres capteurs micro onde au-dessus des surfaces continentales : mise au point de la méthode d'analyse et utilisation de l'émissivité (paramétrisation de l'émissivité, utilisation d'une climatologie glissante dans le temps, autre ?) et étude de l'impact de l'introduction de cette nouvelle information de surface sur l'analyse et la prévision.
- ❖ Validation de l'ensemble de l'approche : émissivité et profils atmosphériques de température et d'humidité, à partir des observations AMSU-A et -B. Pour faire la validation, nous allons profiter de l'expérience AMMA pour avoir des mesures de champs d'humidité et de température issus de radiosondages ou des produits d'humidité restitués à partir d'autres données satellitaires.

Dans le cadre de l'expérience AMMA, et en attendant l'assimilation des données AMSU, les profils de température et surtout l'humidité atmosphériques seront restitués sur l'année 2000 sur l'Afrique à une résolution moyenne de 30 km environ. Ces restitutions pourraient être étendues pour couvrir les cycles saisonniers de l'EOP (Extended Observing Period) de 2005 à 2007. L'inversion des mesures AMSU au-dessus des terres sera également complétée par une inversion cohérente de ces mesures au-dessus des surfaces océaniques. Avec des estimations cohérentes des profils atmosphériques sur les terres et l'océan, l'évolution saisonnière et intra-saisonnière du flux de mousson dans les basses couches, et l'interaction entre les masses d'air de différentes origines en altitude, pourraient être étudiés. Ce travail est au cœur des problématiques AMMA, et contribuera à mieux comprendre le rôle des interactions entre l'atmosphère et les surfaces océanique et continentale sur le développement de la mousson Africaine. Une telle analyse,

réalisée avec la meilleure résolution possible est envisagée à partir des données de l'année 2000 en attendant l'assimilation des données dans les modèles opérationnels, qui ne sera pas réalisée avant 2006. Compte tenu des contraintes d'assimilation dans les modèles de grande échelle, il est vraisemblable qu'une inversion indépendante reste complémentaire de l'assimilation.

### 7.3.2. *Biais instrumentaux AMSU*

L'analyse de l'émissivité de surface, calculée à différentes fréquences et à partir des observations AMSU-A et -B, a montré l'existence d'un biais instrumental vraisemblablement lié à la technique de balayage des deux instruments micro onde. Une dissymétrie entre les deux extrémités de balayage a été mise en évidence sur un ensemble de types de surface. Les résultats montrent que le biais de balayage est plus fort à 31 GHz qu'à 23 GHz et au dessus de surfaces à émissivité faible comme le désert. Ce biais apparaît moins important pour les canaux 50 et 89 GHz. Des simulations de températures de brillance à toutes les fréquences AMSU ont été effectuées au dessus d'une surface océanique et confrontées aux températures de brillance mesurées. Les simulations ont été effectuées à l'aide du modèle ATM et comparées aux simulations effectuées par le modèle de transfert radiatif de l'ECMWF. La différence entre observations et simulations tend à confirmer les biais instrumentaux observés au dessus des terres. Cependant, une analyse plus poussée devrait être menée pour expliquer les biais instrumentaux et proposer des corrections adéquates.

### 7.3.3. *Le Sondeur SAPHIR à bord de MAGHATROPIQUES*

L'instrument SAPHIR (Sondeur Atmosphérique de Profils d'Humidité moyenne Intertropicale par Radiométrie) est proposé par IPSL et l'Observatoire Paris pour faire partie des instruments à bord de MEGHA/TROPIQUES. L'objectif majeur de cet instrument est de fournir des mesures qui permettront l'étude de la distribution verticale de vapeur d'eau dans la troposphère tropicale.

L'instrument aura un mode de balayage transversal, similaire à celui des instruments AMSU-A et -B, avec des angles de balayage variant de  $-42^\circ$  à  $+42^\circ$  par rapport au nadir. Les spécifications de SAPHIR sont basées sur les contraintes suivantes:

- ❖ Autant de canaux que possibles autour de la raie d'absorption de vapeur d'eau à 183.31 GHz (voir le tableau 6-1, pour la liste des canaux).
- ❖ Une résolution horizontale de 10 km au nadir.

L'exploitation des mesures SAPHIR pourrait être réalisée pour la restitution des profils d'humidité atmosphériques dans les régions tropicales. Cependant, les canaux situés au bord de la raie d'absorption de vapeur d'eau de SAPHIR seront contaminés par la surface sauf en cas d'atmosphère très humide. Pour évaluer la sensibilité des canaux 5 et 6 de SAPHIR : (183.31 $\pm$ 11 et 183.31  $\pm$ 6.6) à la surface, une étude de sensibilité a été menée en utilisant les données de l'instrument AMSUB dans des conditions de ciel clair et sec. On s'est limité à la façade Atlantique de l'Afrique du Nord et à 4 jours de données (21 mars 2001, le 10, 11 et 12 février 2001) pour lesquels on dispose des conditions de ciel clair et sec. (Voir tableau 7-2 pour les températures de brillance du 21 mars 2001). Rappelons que les canaux AMSU-B sont les suivants : 89, 150, 183.31 $\pm$ 1, 183.31 $\pm$ 3, et 183.31 $\pm$ 7 GHz. A partir des illustrations de température de brillance (figures :a,b et c rassemblées dans le tableau 7-2), on constate un contraste entre la terre et la mer le long de la côte Atlantique pour le canal 183.31 $\pm$ 7 GHz. Le gradient maximum observé est de 4 à 5 K pour ce même canal.

Le travail effectué dans le cadre de cette thèse servira comme base pour le traitement des données issues de SAPHIR et la restitution des profils d'humidité atmosphériques. En particulier, l'émissivité calculée à 89 et à 150 GHz d'AMSU, pourrait servir à corriger l'impact de la surface sur les mesures effectuées aux canaux 5 et 6 de SAPHIR.

Tableau 7-1: Description des canaux de SAPHIR (Eymard et al. 2003)

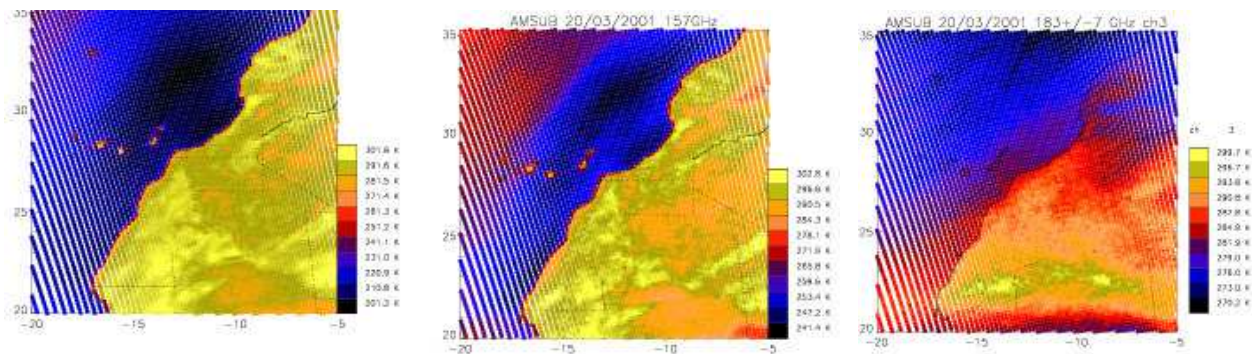
| Channel N°. | Fréquences centrales (GHz) | Largeur de la bande (MHz) | Sensibilité radiométrique (K) | Polarisation |
|-------------|----------------------------|---------------------------|-------------------------------|--------------|
| 1           | 183,31 $\pm$ 0.20          | 200                       | 1,82                          | V            |
| 2           | 183,31 $\pm$ 1.10          | 350                       | 1,01                          | V            |
| 3           | 183,31 $\pm$ 2.70          | 500                       | 0,93                          | V            |
| 4           | 183,31 $\pm$ 4.00          | 700                       | 0,88                          | V            |
| 5           | 183,31 $\pm$ 6.60          | 1200                      | 0,81                          | V            |
| 6           | 183,31 $\pm$ 11.00         | 2000                      | 0,73                          | V            |

Tableau 7-2: Températures de brillance des données AMSUB du 21 mars 2001 à (a) 89 GHz, (b) 150 GHz, et (c) 183.31 $\pm$ 7 GHz.

(a): AMSU-B Tbs à 89 GHz

(b): AMSU-B Tbs à 150 GHz

(c): AMSU-B Tbs 183 $\pm$ 7 GHz



#### 7.3.4. L'émissivité de surface : potentiel pour l'étalonnage des capteurs micro onde ?

Les zones continentales sont peu utilisées pour étalonner en vol les capteurs satellitaires. Ceci est principalement dû à l'émissivité de surface élevée, variable et difficilement prévisible selon les caractéristiques de chaque capteur. Cependant, il existe des régions dans le monde où les conditions atmosphériques ou l'émissivité de la surface sont suffisamment stables pour envisager l'utilisation de l'émissivité pour l'étalonnage des instruments micro onde. Il s'agit de trouver des zones étendues homogènes où la variabilité de la surface est faible dans le temps. C'est le cas par exemple de certaines régions désertiques (désert d'Arabie ou le Sahara) où l'atmosphère est très sèche et où la variation de l'émissivité d'un mois à l'autre est très faible (voir la figure 7-1 pour la variation mensuelle de l'émissivité de surface au-dessus du désert). La forêt tropicale dense est une zone caractérisée par un comportement de quasi corps noir et est de ce fait intéressante pour les besoins d'étalonnage.

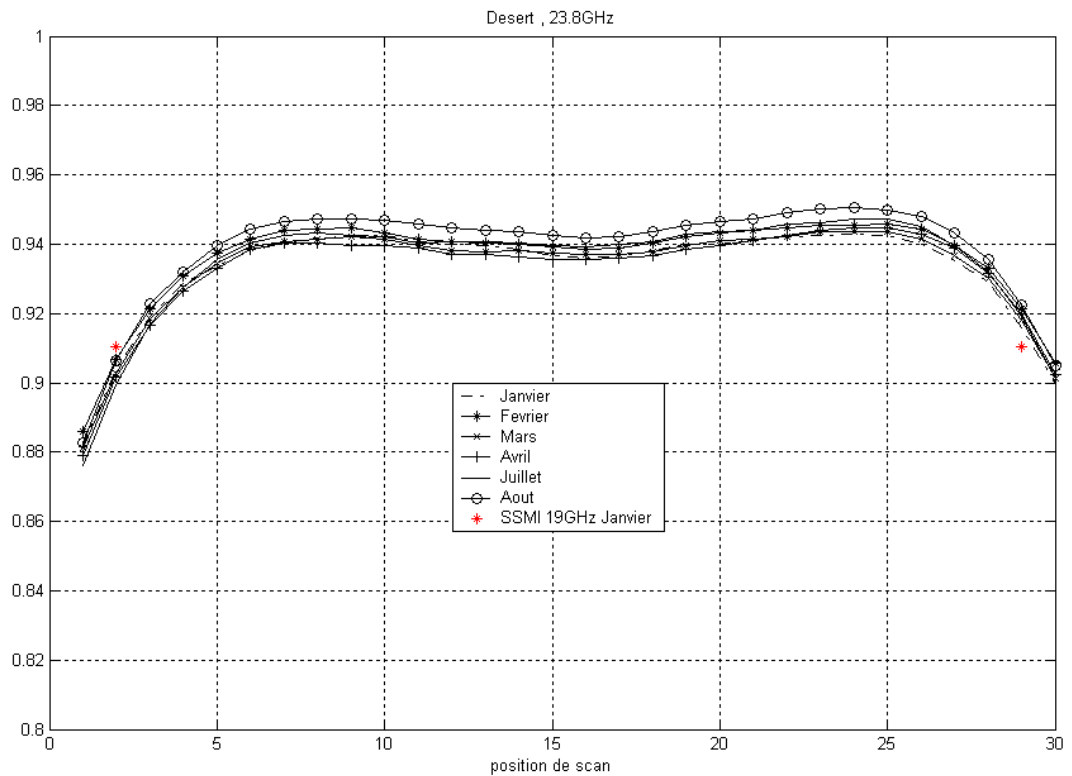


Figure 7-1: Moyenne mensuelle de l'émissivité de surface à 23.8 GHz au dessus du désert pour 6 mois de l'année 2000 selon la position de balayage (les positions 15 et 16 correspondent au nadir)

Cette méthode d'étalonnage a récemment été testée par Eymard et al. (2004) et comparée à d'autres méthodes pour vérifier la qualité et la stabilité en vol des instruments micro onde TMR (mission TOPEX/JASON) et EMWR (mission ERS2/ENVISAT). Les émissivités ont été calculées pour TMR (aux fréquences 18, 21, et 37 GHz) et pour EMWR (aux fréquences 23.8 et 36.5 GHz) au nadir et au dessus de l'Amazonie. Ces émissivités ont ensuite été comparées à celles d'AMSU-A (23.8 et 31.4 GHz) ainsi qu'aux émissivités SSMI (19 et 37 GHz), révélant des biais anormaux (émissivités trop faibles de TMR aux trois fréquences, émissivité trop forte sur le canal 36.5 GHz pour EMWR). L'étude a ainsi montré le potentiel de telles comparaisons pour les besoins d'étalonnage des capteurs micro onde et sera par la suite reconduite sur des séries temporelles plus grandes et au dessus de diverses autres cibles continentales.



### 7.3.5. *Variation saisonnière de l'émissivité de surface : potentiel dans le cadre du programme AMMA ?*

L'analyse de l'émissivité de surface a montré que cette dernière présente des variations saisonnières plus ou moins importantes selon le type de surface et selon la fréquence. Elle est également sujette à des variations fortes induites par l'effet de l'humidification des sols et/ou de la végétation. La question à laquelle on aimerait répondre est la suivante : peut-on facilement lier la variation saisonnière que l'on observe dans l'émissivité de surface à différentes fréquences, à des processus de changement de couvert végétal ou d'humidité des sols induits par le cycle saisonnier et intra-saisonnier de la mousson africaine ?

Afin d'amorcer la réponse à cette question, une tranche longitudinale (de  $-10^{\circ}$  à  $+10^{\circ}$ ) au dessus de l'Afrique a été choisie et les émissivités mensuelles sur 6 mois (janvier, février, mars, avril, juillet et août) de données ont été calculées sur des tranches de latitudes pour différents types de sol en allant de la forêt dense aux zones désertiques (de  $4^{\circ}\text{N}$  à  $24^{\circ}\text{N}$  de latitudes). Pour le calcul des moyennes mensuelles d'émissivités, uniquement, les angles d'observations faibles ont été choisis pour limiter la variabilité angulaire de l'émissivité de surface. Les résultats sont présentés dans la figure 7-2. Sur cette figure, on constate un pic d'émissivité, plus au moins net selon les fréquences, près de l'équateur (forêt tropicale) et qui se déplace au cours du temps pour atteindre les régions plus au nord (des forêts denses, semi désert et les zones désertiques). Ce pic d'émissivité pourrait être attribué à un changement de couvert végétal qui deviendrait plus dense augmentant ainsi l'émissivité. Cependant, il est difficile de tirer des conclusions sur la base de ces moyennes d'émissivité. Notons par ailleurs que mesures SSM/I à des fréquences voisines de celles d'AMSU apparaissent adaptés pour de tels suivis de l'état de la surface (*Prigent et al.*, 2001). Cependant, SSM/I possède une double polarisation pour ces canaux (à l'exception du canal à 22 GHz ayant seulement la polarisation en V) tandis que les instruments AMSU ont une polarisation mélangée.

Il serait nécessaire de réaliser un suivi à plus long terme des émissivités pour pouvoir décorrélérer le signal physique de la surface de celui du bruit (contamination par les nuages en particulier). Une façon d'aborder ce sujet, serait de confronter les estimations de l'émissivité de surface à des paramètres caractérisant le couvert végétal déduits des mesures en visible/infrarouge.

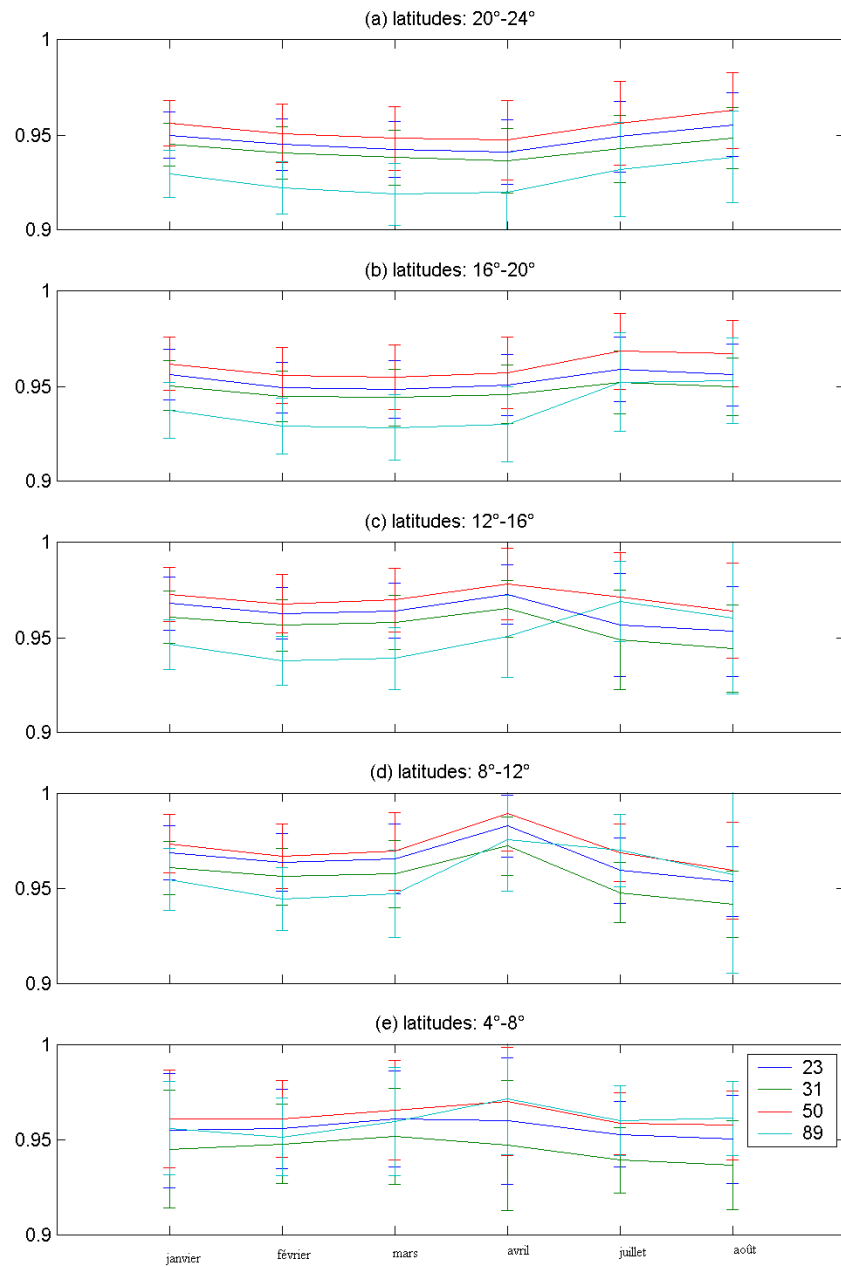


Figure 7-2: Moyennes mensuelles de l'émissivité de surface de Janvier à Août 2000 de 10W à 10E de longitudes et au dessus de tranches de latitudes en allant de la latitude de 4N jusqu'à 24N (du bas vers le haut de l'image) et pour les fréquences de 23, 31, 50, et 89GHz.

Les observations issues de l'instrument MODIS (Moderate-resolution Imaging Spectroradiometer) à bord du satellite Terra de la NASA, permettent ainsi de caractériser « les signes de vie » de la végétation. En effet, les données MODIS peuvent être utilisées pour évaluer globalement la distribution de feuilles vertes au-dessus des terres (LAI(Leaf Area Index)) et également estimer la quantité d'énergie solaire absorbée par ces feuilles (FPAR(Fraction of Photo-synthetically Active Radiation)). Les deux informations sont nécessaires pour comprendre comment la lumière du soleil interagit avec les surfaces continentales à travers la végétation.

Pour illustration, les figures 7-3 et 7-5 présentent des cartes mensuelles de LAI et de FPAR de MODIS à 30 km de résolution et pour les mois de mars, avril, juillet, et août. En parallèle, la figure 7-4 présente des cartes mensuelles d'émissivité de surface à 89 GHz pour la même période. Visuellement, il est difficile de conclure sur une corrélation potentielle entre les trois paramètres. Il y a sûrement nécessité d'affiner les résolutions spatiales et temporelles pour réaliser des comparaisons adéquates.

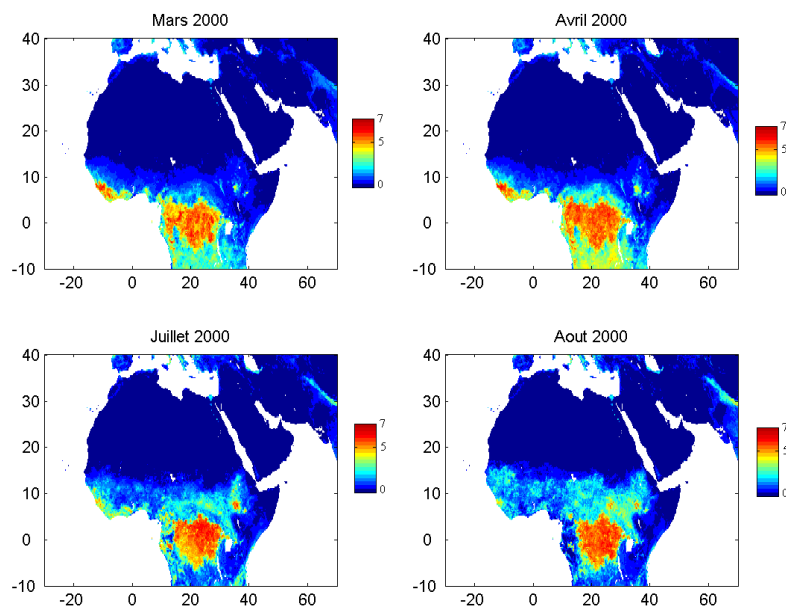


Figure 7-3: Estimations moyennes mensuelles de LAI de MODIS à 0.25° de résolution (<http://cybele.bu.edu>).

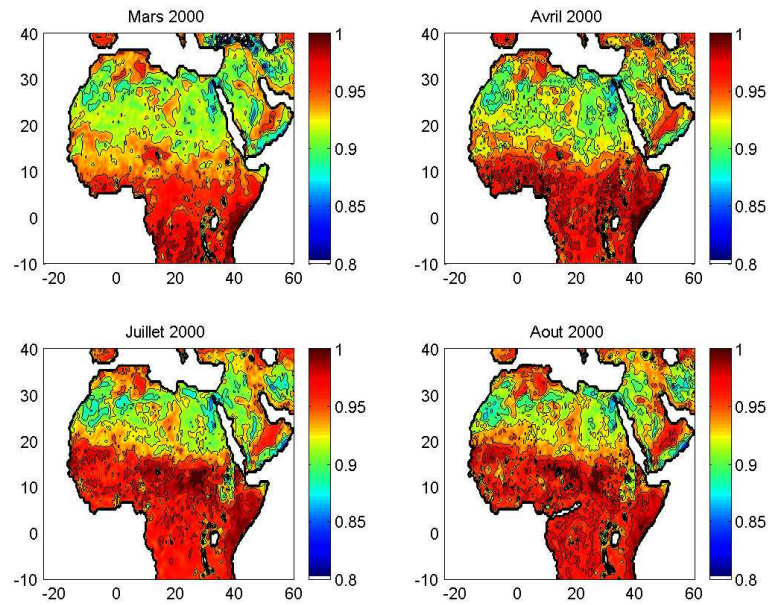


Figure 7-4: Moyennes mensuelles de l'émissivité de surface à 89 GHz.

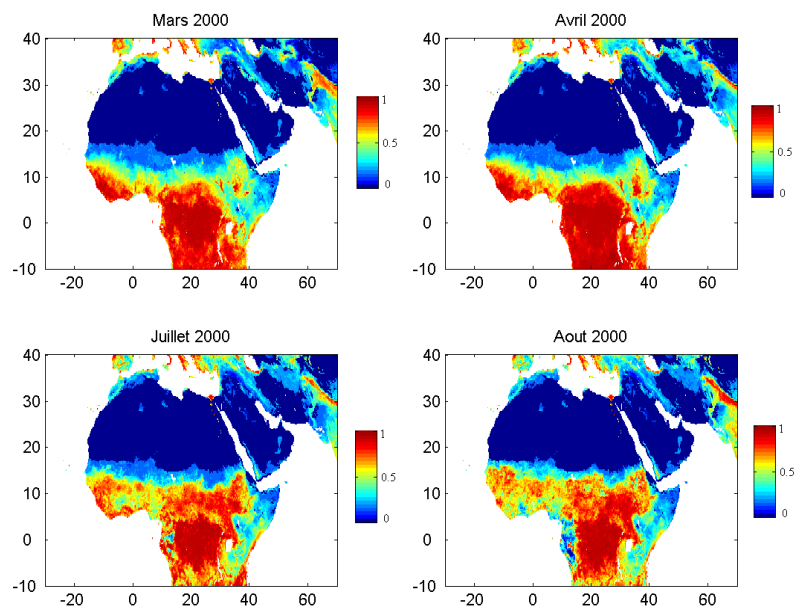


Figure 7-5: Estimations moyennes mensuelles du paramètre FPAR de MODIS à 0.25° de résolution (<http://cybele.bu.edu>).

## REFERENCES

- Aires, F., C. Prigent, W. B. Rossow, and M. Rothstein, A new neural network approach including first guess for retrieval of atmospheric water vapor, cloud liquid water path, surface temperature, and emissivities over land from satellite microwave observations, *J. Geophys. Res.*, 106, 14,887-14,907, 2001.
- Bauer, A. et M. Godon, Temperature dependence of water vapor absorption in the line wing at 190 GHz, *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer*, vol 46, 3, 211-220, 1991.
- Calvet, J.-C., J.-P. Wigneron, A. Chanzy, S. Raju, and L. Laguerre, Microwave dielectric properties of a silt-loam at high frequencies, *IEEE Trans. Geosci. Remote sensing*, vol. 33, pp. 634-642, 1995.
- Choudhury, B.J., Reflectivities of selected land surface types at 19 and 37 GHz from SSM/I observations, *Remote Sens. Environ.*, vol. 46, Issue 1, pp. 1-17, 1993.
- Dickinson, R. E., A. Henderson-Sellers, P.J. Kennedy, and M.F. Wilson, "Biosphere-atmosphere transfer scheme (BATS) for the NCAR community climate model," NCAR Technical Note NCAR/TN275+STR, Boulder, CO. 69 p, 1986.
- English, S., Estimation of temperature and humidity profile information from microwave radiances over different surface types, *J. Appl. Meteorol.*, vol. 38, pp. 1526-1541, 1999.
- Eymard, L., M. Gheudin, P. Laborie, F. Sirou, C. Le Gac, J.P. Vinson, S. Franquet, M. Desbois, F. Karbou, R. Roca, N. Scott, P. Waldteufel, The SAPHIR humidity sounder, *notes techniques de l'IPSL*, 2003.
- Eymard, L., E. Oblis, N. Tran, F. Karbou, A. Pilon, and M. Dedieu, 2004, Long term stability of ERS2 and TOPEX microwave radiometer in-flight calibration, *IEEE Trans on Geoscience and Remote sensing*, submitted.
- Franquet, S., Contribution à l'étude du cycle hydrologique par radiométrie hyperfréquence: algorithmes de restitution (réseaux de neurones) et validation pour la vapeur d'eau (instruments AMSU, SAPHIR) et les précipitations (AMSU, Radarsat sol Baltrad), *Thèse de doctorat de l'Université Paris-Diderot (Paris VII)*, 3 Mars 2003.

Gérard, E., F. Rabier, D. Lacroix, and Z. Sahlaoui, Use of ATOVS raw radiances in the operational assimilation system at Météo-France, *Proc. Of the thirteenth International TOVS study conference, Sainte-Adèle, Canada*, 18-29, 2003.

Goldberg, M. D, D. S. Crosby, and L. Zhou, The limb adjustment of AMSU-A observations: Methodology and validation, *J. Appl. Meteor.*, 40, 70-83, 2001.

Goodrum, G., K. B. Kidwell, and W. Winston, NOAA KLM user's guide, National Oceanic and Atmospheric Administration, 2000

Grody, N. C., J. Zhao, R. Ferraro, F. Weng, and R. Boers, Determination of precipitable water and cloud liquid water over oceans from the NOAA-15 advanced microwave sounding unit, *J. Geophys. Res.*, 106, 2943-2954, 2001.

Karbou, F., C. Prigent, L. Eymard, and J. Pardo, 2004, Microwave land emissivity calculations using AMSU-A and AMSU-B measurements, *IEEE Trans on Geoscience and Remote sensing*, in press.

Karbou, F., F. Aires, C. Prigent, and L. Eymard, 2004, Potential of AMSU measurements for temperature and humidity sounding over land, *J. Geophys. Res.*, in press.

Karbou, F., A new microwave land emissivity parameterization, 2004, *IEEE Trans on Geoscience and Remote sensing*, in revision.

Kelly, G., and P. Bauer, The use of AMSU-A surface channels to obtain surface emissivity over land, snow and ice for Numerical Weather Prediction. *Proc. Of the Eleventh International TOVS study conference, Budapest, Hungary*, 167-179, 2000.

Hewison, T., and R. W. Saunders, Measurements of the AMSU-B Antenna Pattern, *IEEE Trans. On Geoscience and Remote sensing*, V34, 2, 405-412, 1996.

Matthews, E., Global vegetation and land use: new high resolution data bases for climate studies, *J. Clim. Appl. Meteorol.*, 22, 474-486, 1983.

Matzler, C., On the determination of surface emissivity from satellite observations, submitted to *IEEE Geoscience and remote sensing letters*, 2004.

Mazler, C., Passive microwave signatures of landscapes in winter, *Meteorol. Atmos. Phys.*, vol. 54, pp. 241-260, 1994.

Matzler, C., Seasonal evolution of microwave radiation from an oat field, *Remote Sens. Environ.*, vol. 31, pp. 161-173, 1990.

Mo, T., A study of the NOAA 16 AMSU-A brightness temperatures observed over Libyan Desert, *J. Geophys. Res.*, 107, ACL 16-1, 16-7, 2002.

Mo, T., AMSU-A Antenna Pattern corrections, *IEEE Trans. On Geoscience and Remote sensing*, V37, 1, 103-112, 1999.

Pardo, J. R., J. Cernicharo, and E. Serabyn, Atmospheric Transmission at Microwave (ATM): an improved model for millimetre/submillimeter applications, *IEEE Trans. Ant and Prop*, vol. 49, NO. 12, pp. 1683-1694, 2001.

Pardo, J. R., L. Pagani, M. Gerin and C. Prigent, "Evidence of the Zeeman Splitting in the 2(1)->0(1) Rotational Transition of the atmospheric 16O18O Molecule from Ground-Based Measurements", *J. Quant. Spectr. and Radiat. Transfer*, 54, N6, 931-943, 1995.

Pardo, J. R., J. Cernicharo, E. Gonzalez-Alfonso and V. Bujarrabal; "Simultaneous Observations of vibrationally excited rotational lines of 28SiO in Evolved Stars" *Astronomy and Astrophysics*, 329, 219-228, 1998.

Pardo, J. R., M. Ridal, D. P. Murtagh and J. Cernicharo. "Microwave temperature and pressure measurements with the Odin satellite: I. Observational method" *Canadian Journal of Physics*, 80(4), 443-454, 2002.

Planck, M., "Über das Gesetz der Energieverteilung in Normalspektrum", *Ann. Physik*, 4, ser. 4, P. 553-563, 1901.

Prigent, C., W. B. Rossow, and E. Matthews, Microwave land surface emissivities estimated from SSM/I observations, *J. Geophys. Res.*, 102, 21867-21890, 1997.

Prigent, C., W. B. Rossow, and E. Matthews, Global maps of microwave land surface emissivities: Potential for land surface characterization, *Radio Sc.*, 33, 745-751, 1998.

Prigent, C. and W. B. Rossow, Retrieval of surface and atmospheric parameters over land from SSM/I: Potential and limitation, *Quat. J. Royal Meteor. Soc.*, 125, 2379-2400, 1999.

Prigent, C., J. -P. Wigneron, W. B. Rossow, and J. R. Pardo-Carrion, Frequency and angular variations of land surface microwave emissivities: Can we estimate SSM/T and AMSU emissivities from SSM/I emissivities?, *IEEE Trans. Geosc. Remote Sensing*, 38, 2373-2386, 2000.

Prigent, C., J.R. Pardo, M.I. Mishchenko and W.B. Rossow "Microwave polarized signatures generated within cloud systems: SSM/I observations interpreted with radiative transfer simulations" *Journal of Geophysical Research*, 106, 28243-28258, 2001.

*Proc. Of the thirteenth International TOVS study conference, Sainte-Adèle, Canada*, 18-29, 2003.

Rabier, F., A. McNally, E. Andersson, P. Courtier, P. Undén, J. Eyre, A. Hollingsworth, and F. Bouttier, The ECMWF implementation of three-dimensional variational assimilation (3D-Var). II Structure functions, *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 124, 1809-1829, 1998.

- Rodgers, C. D., Characterization and error analysis of profiles retrieved from remote sounding measurements, *J. Geophys. Res.*, 95, 5587-5595, 1990.
- Rosenkranz, P., Retrieval of temperature and moisture profiles from AMSU-A and AMSU-B measurements, *IEEE Trans. On Geoscience and Remote sensing*, 39, 2429-2435, 2001.
- Rossow, W.B., and R. A. Schiffer, ISCCP cloud data products, *Bull. Am. Meteor. Soc.*, 72, pp. 2-20, 1991.
- Rumelhart, D. E., G. E. Hinton, and R. J. Williams, Learning internal representations by error propagation, in *Parallel Distributed Processing: Explorations in the microstructure of cognition*, Vol. I, *Foundations*, edited by D.E. Rumelhart, J.L. McClelland, and the PDP Research group, pp. 318-362, MIT Press, Cambridge, Mass., 1986.
- Simmons, A. J., and J.K. Gibson, the European Centre for Medium-Range Weather Forecasts: The ERA-40 Project Plan, 2000.
- Shi, L., Retrieval of atmospheric temperature profiles from AMSU-A measurements using a neural network approach, *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 18, 340-347, 2001.
- Wagner, D., E. Ruprecht, and C. Simmer, A combination of microwave observations from satellites and an EOF analysis to retrieve vertical humidity profiles over the ocean, *J. Appl. Meteor.*, 29, 1142-1157, 1990.
- Weng, F., L. Zhao, R. Ferraro, G. Poe, X. Li, and N. Grody, Advanced Microwave Sounding Unit Cloud and Precipitation Algorithms, *Radio Sci.*, 38, 8,086-8,096, 2003.
- Ulaby, F. T., R. K. Moore, and A.K. Fung, *Microwave Remote Sensing- Active and Passive*, Vol. I: *Microwave Remote Sensing Fundamentals and Radiometry*. Artech House, Boston (MA), USA, 1982.
- Ulaby, F. T., R. K. Moore, and A.K. Fung, *Microwave Remote Sensing- Active and Passive*, Vol. III: *From Theory to Applications*. Addison-Wesley Readings, Dedham (MA), USA, 1986.
- Westwater, ED. R., J.B. Snider., and M. J. Falls, Ground based radiometric observations of atmospheric emission and attenuation at 20.6, 31.65, and 90.0 GHz: A comparison of measurements and theory, *IEEE Trans. On Ant. And Prop*, 38, 10, October 1990.
- Wiedner, M., C. Prigent, J. R. Pardo, O. Nuissier, J.-P. Chaboureaud, J.-P. Pinty, and P. Mascart. "Modeling of passive microwave responses in convective situations using output from mesoscale models: Comparison with TRMM/TMI satellite observations", *Journal of Geophysical Research*, 109, D6, 06214, 2004.



- Wilson, M. F., A. Henderson-Sellers, R. E. Dickinson, and P. J. Kennedy, 1987: Investigation of the sensitivity of the land-surface parameterization of the NCAR community climate model in region of tundra vegetation. *J. Climatol.*, **7**, 319-343.
- Wilson, M. F., A. Henderson-Sellers, R. E. Dickinson, and P. J. Kennedy, 1987: Sensitivity of the biosphere-atmosphere transfer scheme (BATS) to the inclusion of variable soil characteristics. *J. Clim Appl. Meteor.*, **26**, 341-362.
- Wigneron, J.-P., D. Guyon, J.-C. Calvet, G. Courier, and N. Bruignier, "Monitoring coniferous forest characteristics using a multifrequency microwave radiometry," *Remote Sens. Environ.*, vol. 60, pp. 299-310, 1997.
- Zhao, L., and F. Weng, Retrieval of ice cloud parameters using the Advanced Microwave Sounding Unit (AMSU), *J. Appl. Meteor.*, **41**, 384-395, 2002.

## ANNEXE 1

---

|    |   |     |
|----|---|-----|
| 1. | SPECTROSCOPIE DU RAYONNEMENT _____                            | 145 |
| 2. | LES NIVEAUX D' ENERGIE _____                                  | 146 |
| 3. | L' ABSORPTION MOLECULAIRE _____                               | 147 |
| 4. | BASES THEORIQUES DU TRANSFERT RADIATIF _____                  | 149 |
| 5. | EQUATION DE TRANSFERT RADIATIF DANS UN MILIEU NON DIFFUSANT _ | 151 |

Cette annexe récapitule quelques notions de base liées à l'absorption moléculaire et au transfert radiatif atmosphérique.

## 1. SPECTROSCOPIE DU RAYONNEMENT

Le rayonnement électromagnétique peut être caractérisé par sa fréquence  $\nu$  ou sa longueur d'onde  $\lambda$  et avoir des propriétés ondulatoires déterminantes dans les processus d'interférences ou de polarisation. Il peut également être étudié en terme de flux de photons se propageant dans le vide à la vitesse de la lumière. Dans ce cas, on lui associe l'énergie des photons.

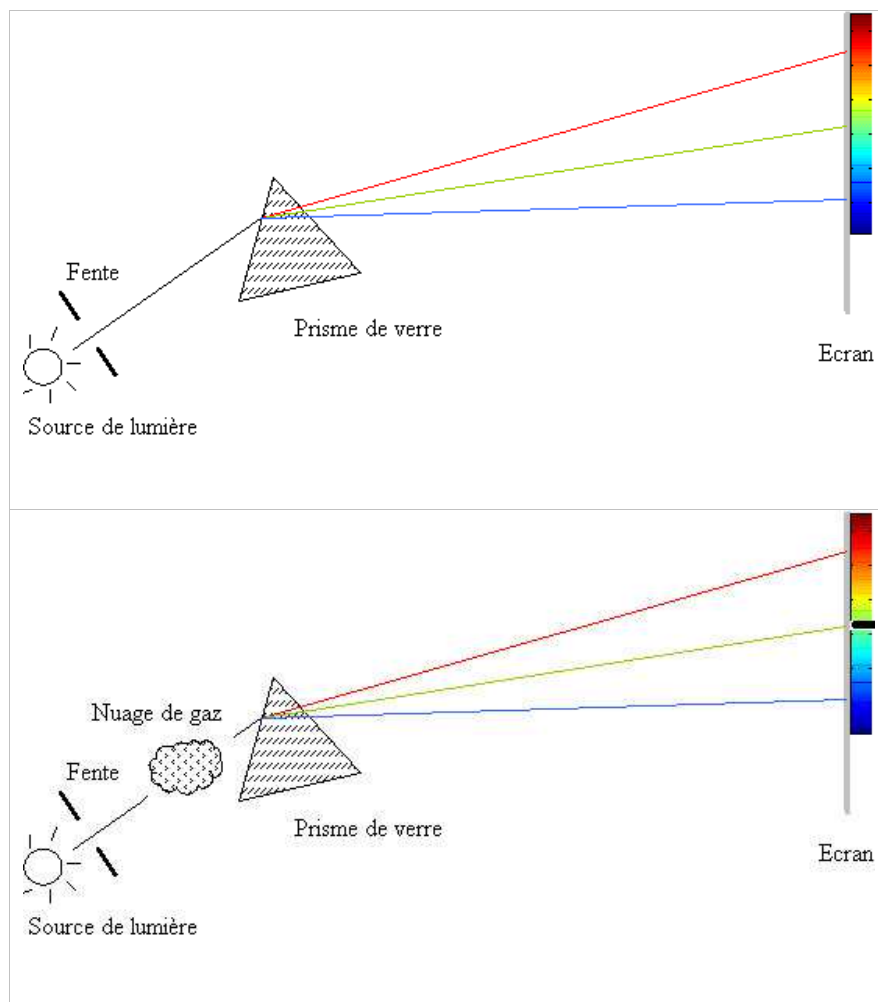


Figure 1: Schéma simplifié du spectrographe à prisme.

La nature corpusculaire du rayonnement électromagnétique permet entre autres choses d'expliquer l'occurrence de raies d'absorption à certaines fréquences dans un milieu donné. En effet, la mécanique quantique nous explique que les raies se produisent par le changement d'énergie des électrons des atomes. Si les électrons gagnent de l'énergie, une raie sombre est observée (raie d'absorption), si ils en perdent, une raie brillante est observée (raie d'émission). Pour illustrer ce phénomène, prenons l'exemple de la lumière visible. Cette lumière a une multitude de longueurs d'onde comprise entre 0.4 et 0.8  $\mu m$ . La figure 1 nous illustre par un schéma approximatif d'un spectrographe à prisme, le principe d'absorption par un gaz à une longueur d'onde donnée. Dans le premier cas (en haut de la figure 1), et grâce au mécanisme [source de lumière+fente+prisme de verre], on peut observer la décomposition de la lumière en un spectre visible du violet au rouge. Par contre, dès qu'on place un mélange de gaz sur le chemin du rayonnement (en bas de la figure 1), une raie sombre peut être observée à certaines fréquences (couleurs). Certains constituants du mélange de gaz ont interagi avec le rayonnement incident et le résultat de ces interactions a été observé. C'est là tout l'intérêt des raies d'absorption, à partir desquelles on pourrait remonter à la concentra du gaz qui les a provoquées.

## 2. LES NIVEAUX D' ENERGIE

Les phénomènes d'absorption et d'émission sont engendrés par l'échange d'énergie entre les molécules atmosphériques et le champ électromagnétique. En règle générale, une molécule peut être représentée sous forme d'atomes dont les électrons assurent les liaisons chimiques. L'énergie totale d'une molécule peut être exprimée en première approximation selon la loi de Born-Oppenheimer :

$$E_{\text{TOTALE}} = E_{\text{ROT}} + E_{\text{VIB}} + E_{\text{ELE}} \quad (1)$$

$E_{\text{ROT}}$  : L'énergie de rotation de la molécule

$E_{\text{VIB}}$  : L'énergie vibrationnelle des noyaux et dépend de leurs masses et de leurs dispositions relatives.

$E_{\text{ELE}}$  : L'énergie des électrons et dépend du nombre d'électrons et de la structure de la molécule.

L'énergie électronique est de loin la plus importante, vient ensuite l'énergie de vibration et puis l'énergie de rotation. L'atome d'hydrogène par exemple possède un seul électron placé dans le niveau d'énergie le plus proche du noyau K. Par contre, il possède également tous les autres niveaux d'énergie L, M, N, O, P, et Q qui sont graduellement plus grand et tous inoccupés. L'électron de l'atome d'hydrogène

possède une énergie égale à celle du niveau K. par conséquent, il lui faut une énergie égale à celle du niveau L, s'il veut passer du niveau K au niveau L.

Mais comment lier les niveaux d'énergies de l'atome et les raies spectrales ?

C'est à Planck que revient la découverte du phénomène qui lie les niveaux d'énergie et les raies d'absorption. Pour le cas de l'atome d'hydrogène, l'électron est normalement placé sur le niveau K d'énergie. Un photon de rayonnement incident dont la fréquence est telle qu'il peut déplacer l'électron du niveau K à un niveau supérieur sera absorbé. L'électron ne peut pas rester longtemps dans le niveau d'énergie supérieur. Par conséquent, il retombera au niveau initial K en émettant un rayonnement à la même fréquence que celui qui a été absorbé mais cette fois dans toutes les directions. Dans une direction donnée (l'écran par exemple de la figure 1.1), uniquement une petite partie du rayonnement sera observée d'où la raie sombre.

Planck a également établi que l'énergie ne peut pas avoir une variation continue. Cela veut dire que l'échange d'énergie entre le rayonnement et la matière ne peut se faire que par des multiples d'une quantité élémentaire : C'est la constante de Planck ( $h=6.62 \cdot 10^{-27}$  J.s). L'échange entre rayonnement et matière se fait alors selon l'équation :  $E = h\nu$  avec  $h$  la constante de Planck et  $\nu$  la fréquence.

### 3. L'ABSORPTION MOLECULAIRE

On a vu précédemment que le spectre d'absorption des composant gazeux de l'atmosphère est engendré par les variations de niveaux d'énergie quantifiées propres à chaque molécule gazeuse.

La variation du niveau d'énergie pour une molécule donnée peut être due à :

- ❖ **Des transitions électroniques** : un photon incident ne peut être absorbé par un électron de la molécule que si son énergie correspond parfaitement à l'énergie nécessaire pour permettre à l'électron de transiter de son niveau d'énergie initial et un niveau supérieur. En général, les transitions électroniques sont responsables du spectre d'émission/absorption dans l'ultraviolet et le visible.
- ❖ **Des mouvements de rotation** : La molécule peut tourner autour de ses axes d'inertie. Une molécule diatomique (avec des masses d'atomes  $m_1$  et  $m_2$ ) pourrait être assimilée à un rotateur rigide non déformable. La mécanique quantique établit que l'énergie de rotation est quantifiée par le nombre quantique de rotation  $J$  selon la formule suivante :  $E_{ROT} = BJ(J+1)$  (2)

$$B = \frac{h^2}{8\pi^2 \mu a^2} \quad (3)$$

B: constante rationnelle

h: Constante de Planck

a: distance internucléaire

$$\mu = \frac{m_1 m_2}{m_1 + m_2} \quad (4)$$

$\mu$  : masse réduite

Cependant, la formulation donnée sur la base du rotateur rigide n'est pas tout à fait exacte car le rotateur n'est pas vraiment rigide mais plutôt déformable. En présence de forces centrifuges, la longueur de la liaison varie. Ainsi, l'énergie du rotateur devient :

$$E_{ROT} = BJ(J+1) - DJ^2(J+1)^2 \quad (5)$$

D est une constante plus petite que B.

Selon la théorie quantique, les transitions de rotation d'un niveau d'énergie J ne peut se faire que vers un niveau d'énergie J+1 en cas d'absorption ou un niveau d'énergie J-1 en cas d'émission. En plus les molécules ayant un moment dipolaire nul ne présentent ni émission ni absorption par rotation.

- ❖ **Des mouvements de vibration** : Pour une molécule diatomique par exemple, ces mouvements correspondent aux oscillations de la longueur de liaison de la molécule autour de sa longueur d'équilibre. La fréquence de vibration d'un tel oscillateur dépend de la masse des atomes ( $m_1$  et  $m_2$ ) et de la force de liaison. En supposant qu'un tel oscillateur est harmonique (l'élongation de la liaison est proportionnelle à la force exercée), la mécanique quantique établit que son énergie est quantifiée et dépend d'un nombre entier  $v$  appelé nombre quantique de vibration :

$$E_{VIB} = (v + \frac{1}{2})h\nu_0 \quad (6)$$

La fréquence de vibration est donnée par :

$$\nu_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{\mu}} \quad (7)$$

k: constante de raideur de la liaison

$\mu$  : masse réduite

Ainsi, un rayonnement lumineux peut faire passer une molécule d'un état d'énergie à un autre état supérieur. Si le rayonnement incident est de forte énergie (domaine visible, ultraviolet), le spectre

d'absorption est généralement constitué par la superposition complexe d'états de transition de rotation et de vibration. Si par contre, le rayonnement incident est de faible énergie (domaine des micro-ondes) l'énergie de rotation des molécules est modifiée. Dans le domaine de l'infrarouge, les deux modes rotation et vibration sont responsables du spectre d'absorption moléculaire. Notons, que tous ces processus ne peuvent intervenir que si la fréquence du rayonnement incident correspond exactement à l'une des fréquences de résonance d'une espèce moléculaire donnée.

#### 4. BASES THEORIQUES DU TRANSFERT RADIATIF

Dans la gamme des hyper fréquences, un capteur passif à bord d'un satellite mesure le rayonnement électromagnétique émis par différentes couches atmosphériques, la Terre et le fond cosmique (figure 2). Dans cette configuration, le capteur reçoit à la fois le rayonnement naturel de la surface de la terre en partie atténué par l'atmosphère, le rayonnement émis par l'ensemble des couches atmosphériques et enfin le rayonnement descendant réfléchi par la surface et atténué par l'atmosphère. Ce dernier résulte de la contribution du fond cosmique et de l'émission des couches atmosphériques successives atténuée par les couches atmosphériques rencontrées lors de la propagation du rayonnement.

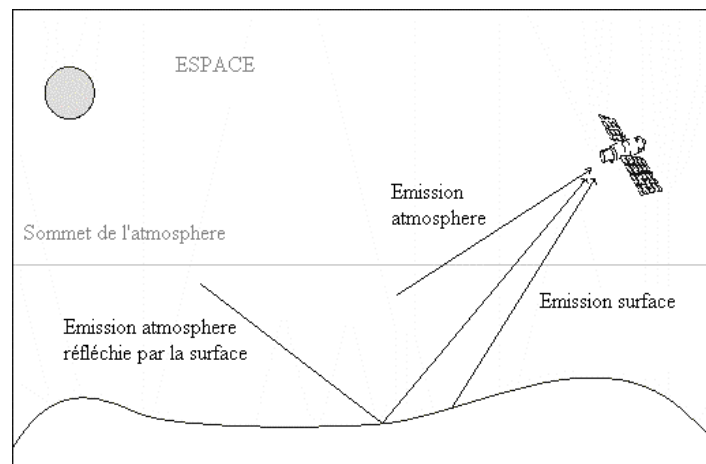


Figure 2: Sources de rayonnement intervenant dans le transfert radiatif

La matière émet naturellement de l'énergie électromagnétique communément mesurée par la luminance spectrale ou la brillance spectrale. Un corps noir est un corps parfait qui absorbe et émet du rayonnement dans toutes les directions et à toutes les gammes de fréquences. Il est caractérisé par la brillance spectrale [Planck, 1901] :

$$B_{\nu} = \frac{2h\nu^3}{C^2} \frac{1}{\exp\left(\frac{h\nu}{kT}\right) - 1}, \text{ W/m}^2.\text{Hz}^{-1}\text{sr}^{-1} \quad (8)$$

$h$  : constante de Planck ( $h=6.626176 \times 10^{-34}$  Js)

$k$  : constante de Boltzmann ( $k=1.380662 \times 10^{-23}$  J/K)

$C$  : Vitesse de la lumière ( $C=2.99792458 \times 10^8$  m/s)

$\lambda$  : Longueur d'onde (m)

Dans la gamme des hyperfréquences, et pour une température physique voisine de 300 K,  $h\nu \ll kT$ . Il est donc possible de faire un développement limité au premier ordre du terme exponentiel dans l'équation (1), ce qui conduit à l'approximation de Rayleigh Jeans :

$$B_{\nu} = \frac{2kT}{\lambda^2} \quad (9)$$

$\lambda$  : Longueur d'onde (m)

L'approximation de Rayleigh Jeans n'est pas valide pour des fréquences élevées combinées à des températures physiques très basses. C'est le cas du rayonnement cosmique à 2.7 K pour lequel il est nécessaire de prolonger le développement limité au second ordre du terme exponentiel dans l'équation (1) :

$$B_{\nu} = \frac{2kT\nu^2}{C^2} - \frac{h\nu^3}{C^2} \quad (10)$$

La brillance spectrale du corps noir à la température physique  $T$ , peut alors s'écrire :

$$B_{\nu} = \frac{h\nu}{k(\exp(\frac{h\nu}{kT}) - 1)} + \frac{h\nu}{2k} \quad (11)$$

Un corps naturel avec une température physique  $T$  émet une énergie moins importante de celle émise par le corps noir à la même température physique. On définit alors la température de brillance  $T_b$  qui est associée au corps naturel comme la température d'un corps noir ayant la même brillance spectrale que le corps naturel à la même température physique.



## 5. EQUATION DE TRANSFERT RADIATIF DANS UN MILIEU NON DIFFUSANT

L'interaction entre la matière et le rayonnement électromagnétique est régie par les phénomènes d'émission et de diffusion qui contribuent à l'atténuation ou l'extinction du signal rayonné. Dans tout ce qui suit, nous allons nous limiter aux milieux non diffusants (en absence de nuages et d'hydrométéores).

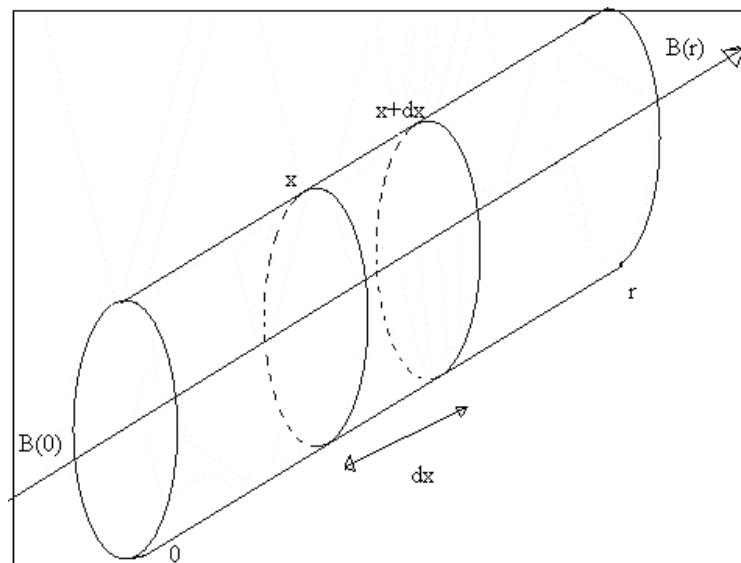


Figure 3: Schéma des brillances spectrales entrantes et sortantes d'un cylindre infinitésimal d'un milieu non diffusant.

Une onde électromagnétique se propageant sur une distance  $r$  dans un milieu non diffusant (figure 3) a une brillance spectrale entrante  $B(0)$  et une brillance sortante  $B(r)$ . La perte d'énergie après le parcours d'une distance  $dx$  peut s'écrire :

$$dB = -\alpha(x)B(x)dx \quad (12)$$

$\alpha(x)$  : coefficient d'extinction du milieu sur le parcours  $dx$  (Np/m).

En même temps, le milieu émet un rayonnement  $\alpha(x)J(x)dx$ ,  $J(x)$  est appelée la fonction source. Selon la loi de Kirchhoff et dans le cas d'un équilibre thermodynamique local, l'émission

thermique d'un corps est égale à son absorption. Et dans ce cas, la fonction source vaut la fonction de Planck (qu'on notera  $B^*$ ) à la température physique  $T$ .

Ainsi, la différence entre l'énergie émise et absorbée vérifie :

$$dB = B(x + dx) - B(x) = -\alpha(x)B(x)dx + \alpha(x)B^* dx \quad (13)$$

On définit l'épaisseur optique par :

$$d\tau = \alpha(x)dx \quad (14)$$

On obtient l'équation de transfert radiatif pour un milieu non diffusant :

$$\frac{dB}{d\tau} + B = B^* \quad (15)$$

Dans l'hypothèse d'un milieu isotherme, l'intégration de l'équation (16) sur la longueur du cylindre vvvv :

$$B(r) = B(0)\exp(-\tau) + B^*(1 - \exp(-\tau)) \quad (17)$$

$$\tau(0, r) = \int_0^r \alpha(x)dx \quad (18)$$

$\tau$  : Opacité du milieu entre 0 et  $r$ .

Avec l'approximation de Rayleigh Jeans, on peut faire intervenir la température de brillance  $T_B$ . Avec cette approximation, la brillance spectrale d'un corps noir est proportionnelle à sa température physique.

Pour un capteur à bord d'un satellite observant la terre avec un angle  $\theta$  par rapport au nadir, l'équation de transfert radiatif doit être résolue depuis le sol jusqu'au satellite. Dans cette perspective, on considère que l'atmosphère terrestre est une succession de couches atmosphériques planes, parallèles, homogènes et qui vérifient l'équilibre thermodynamique locale. L'atmosphère est alors stratifiée en  $N$  couches horizontales jusqu'à une altitude  $H$  pour laquelle l'effet de l'air est négligée (sommet de l'atmosphère). En faisant intervenir les contributions de chaque couche atmosphérique depuis le sol et jusqu'au sommet de l'atmosphère, l'expression de la température de brillance qui est mesurée par le satellite devient :

$$T_B(\vartheta, \theta) = \varepsilon_0 T_0 \Gamma + (1 - \varepsilon_0) \Gamma T_{\downarrow} + T_{\uparrow} \quad (19)$$

$$T_{\downarrow} = \int_0^{\infty} \alpha(\vartheta, z) e^{-\int_0^z \alpha(\vartheta, z') dz'} T(z) dz \quad (20)$$

$$T_{\uparrow} = \int_0^{\infty} \alpha(\vartheta, z) e^{-\int_z^{\infty} \alpha(\vartheta, z') dz'} T(z) dz \quad (21)$$

$$\Gamma = e^{\frac{-\tau(0, \infty)}{\cos(\theta)}} \quad (22)$$

$T_B(\vartheta, \theta)$  : La température de brillance mesurée par la satellite à la fréquence  $\nu$  et à l'angle  $\theta$ .

$\epsilon_0$  : L'émissivité de la surface de la Terre à la fréquence  $\nu$ .

$T_0$  : Température physique de la surface de la Terre.

$T(z)$  : Température physique de l'atmosphère à l'altitude  $z$ .

$\Gamma$  : Transmission atmosphérique.

$T_{\downarrow}$  : Rayonnement atmosphérique descendant issu de toutes les directions, incluant le rayonnement cosmique à 2.7 K descendant atténué par l'atmosphère.  $T_{\downarrow}$  est par la suite réfléchi par la surface et atténué par l'atmosphère jusqu'au capteur satellite.

$T_{\uparrow}$  : Rayonnement montant émis par l'atmosphère selon la direction d'observation.

Le premier terme de l'équation (19) représente l'émission de la surface de la terre atténuée par l'atmosphère.

Le second terme représente le rayonnement émis vers le sol et réfléchi par la surface et atténué par l'atmosphère.

Le dernier terme représente l'émission de chaque couche atmosphérique, chacune des émissions est atténuée par la couche atmosphérique d'au dessus.

## ANNEXE 2

---

Le tableau suivant donne les coefficients de la paramétrisation de l'émissivité de surface discutée dans la publication associée au chapitre5. Le champ « code » correspond au code de végétation (pour plus de détails, voir l'article du chapitre5).

| CODE | CHANNELS | F1               | F2              | F3              | F4              | F5              | F6    |
|------|----------|------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-------|
| 1    | 23.8 GHz | -1.093472390E-8  | -6.308473020E-7 | 4.748633029E-6  | 5.107662881E-5  | -9.939421902E-5 | 0.955 |
|      | 31.4 GHz | 1.189803000E-10  | -6.477104508E-7 | 2.610710091E-6  | 3.905334634E-5  | -2.617977773E-5 | 0.945 |
|      | 50.3 GHz | -9.835798800E-9  | -4.669367053E-7 | 1.063107685E-6  | 7.239562894E-7  | 7.291359365E-5  | 0.964 |
|      | 89 GHz   | -2.398900300E-9  | -3.889996457E-7 | 3.751669931E-7  | -1.677788612E-5 | -5.497855904E-5 | 0.948 |
|      | 150 GHz  | 4.227785640E-8   | -1.452538779E-6 | -1.185762517E-6 | 3.636759591E-5  | -7.143459480E-4 | 0.919 |
| 2    | 23.8 GHz | -3.258606400E-9  | -1.023269046E-6 | 4.506005919E-6  | 9.028794023E-5  | -7.958061161E-5 | 0.964 |
|      | 31.4 GHz | 1.511651100E-9   | -9.800776426E-7 | 3.691397717E-6  | 7.424110842E-5  | -3.395200807E-7 | 0.958 |
|      | 50.3 GHz | 1.867753200E-9   | -5.704192606E-7 | -2.686884308E-6 | 3.715719918E-5  | 2.832668078E-4  | 0.965 |
|      | 89 GHz   | 1.414845050E-8   | -4.843768978E-7 | -5.820564653E-6 | 1.226025582E-5  | 5.145199700E-4  | 0.935 |
|      | 150 GHz  | 1.190586040E-8   | -2.389673185E-6 | 7.873601857E-6  | 7.263287270E-5  | -1.098084888E-3 | 0.921 |
| 3    | 23.8 GHz | 5.319901840E-8   | -6.729520452E-7 | -1.106355006E-5 | 1.860162700E-5  | 6.829215655E-4  | 0.962 |
|      | 31.4 GHz | 2.465744580E-8   | -6.955710778E-7 | -6.310543069E-6 | 3.192916246E-5  | 7.242917507E-4  | 0.951 |
|      | 50.3 GHz | -3.290315870E-8  | -1.191332514E-6 | 4.887098350E-6  | 6.825018579E-5  | 2.560580979E-4  | 0.949 |
|      | 89 GHz   | -5.868217910E-8  | -4.205251698E-7 | 1.442880624E-5  | -2.657849731E-5 | -5.202311818E-4 | 0.919 |
|      | 150 GHz  | 2.024007460E-8   | -1.311261132E-6 | -1.431274146E-6 | 1.857402563E-4  | 4.549488033E-4  | 0.897 |
| 5    | 23.8 GHz | -1.025523580E-8  | -6.502291067E-7 | 4.244960311E-6  | 4.225369424E-5  | 2.248690479E-5  | 0.965 |
|      | 31.4 GHz | -3.701252300E-9  | -5.964179390E-7 | 2.798178243E-6  | 1.295054879E-5  | 1.043889254E-4  | 0.957 |
|      | 50.3 GHz | -4.810677300E-8  | -4.376327995E-7 | 9.050373233E-6  | 4.281947033E-7  | -8.591196410E-5 | 0.968 |
|      | 89 GHz   | -2.961043810E-8  | -4.797316960E-7 | 6.986606829E-6  | -7.430909757E-6 | -2.028054138E-4 | 0.953 |
|      | 150 GHz  | -5.660358890E-8  | -9.690634164E-7 | 1.468353284E-5  | -1.967512993E-4 | -2.224292011E-4 | 0.935 |
| 6    | 23.8 GHz | -9.229013200E-9  | -1.080714508E-7 | 4.284433786E-6  | -4.316559963E-5 | -3.073324738E-4 | 0.962 |
|      | 31.4 GHz | -2.68072000E-9   | -1.659552252E-7 | 2.523548213E-6  | -4.305530072E-5 | -2.051903318E-4 | 0.951 |
|      | 50.3 GHz | -2.338179790E-8  | -2.906640914E-7 | 4.323140263E-6  | -3.408456765E-5 | -2.934125774E-4 | 0.967 |
|      | 89 GHz   | -1.759734160E-8  | -3.984221719E-7 | 3.112502651E-6  | -4.485202445E-5 | -2.365123388E-4 | 0.964 |
|      | 150 GHz  | 2.931727952E-7   | -5.391714611E-6 | -5.353729032E-5 | 1.858492937E-4  | 1.073828774E-3  | 0.979 |
| 7    | 23.8 GHz | -4.908392200E-9  | -9.272100176E-7 | 3.928882783E-6  | 9.459070818E-5  | 1.103499664E-4  | 0.963 |
|      | 31.4 GHz | -3.032110400E-9  | -8.588583020E-7 | 3.520722237E-6  | 7.066082682E-5  | 1.416019715E-4  | 0.956 |
|      | 50.3 GHz | -2.226707400E-8  | -8.089700146E-7 | 3.926048469E-6  | 7.867933102E-5  | 2.035179330E-4  | 0.970 |
|      | 89 GHz   | -1.991738770E-8  | -8.626759418E-7 | 5.147429581E-6  | 5.033127742E-5  | -2.962830432E-5 | 0.952 |
|      | 150 GHz  | 7.799641630E-8   | -3.211406733E-6 | -9.711654633E-6 | 1.525844475E-4  | -2.127779222E-4 | 0.959 |
| 8    | 23.8 GHz | 6.712111300E-9   | -2.134845223E-6 | 6.110209957E-6  | 2.437346025E-4  | -2.528981942E-4 | 0.938 |
|      | 31.4 GHz | 8.526875600E-9   | -2.140054187E-6 | 7.221934844E-6  | 2.311972584E-4  | -2.492286415E-4 | 0.933 |
|      | 50.3 GHz | -2.777372300E-9  | -1.831443591E-6 | 2.056286634E-6  | 2.020850924E-4  | -5.862562643E-5 | 0.947 |
|      | 89 GHz   | 1.089417800E-9   | -1.575156497E-6 | 2.581164373E-6  | 1.460356682E-4  | -1.482319656E-4 | 0.924 |
|      | 150 GHz  | 3.851844210E-8   | -2.461659704E-6 | -1.547404508E-6 | 1.284519857E-4  | -3.942370606E-4 | 0.911 |
| 11   | 23.8 GHz | -1.606443900E-9  | -1.548552368E-6 | 6.398920171E-6  | 1.637422356E-4  | -2.977715679E-4 | 0.940 |
|      | 31.4 GHz | 5.992497100E-9   | -1.576789251E-6 | 5.627969900E-6  | 1.581288505E-4  | -1.954296950E-4 | 0.935 |
|      | 50.3 GHz | -7.742248700E-9  | -1.372285664E-6 | 2.333961777E-6  | 1.392525904E-4  | -4.748262227E-5 | 0.949 |
|      | 89 GHz   | -1.885649200E-9  | -1.209498142E-6 | 1.863767953E-6  | 1.065812917E-4  | -4.962488497E-5 | 0.934 |
|      | 150 GHz  | 6.252128640E-8   | -2.263211771E-6 | -8.407389393E-6 | 1.244789734E-4  | -1.460345771E-4 | 0.937 |
| 13   | 23.8 GHz | 2.245973540E-8   | -7.645753357E-7 | -7.174849222E-6 | 1.110414823E-4  | 1.391557115E-3  | 0.942 |
|      | 31.4 GHz | 3.903784500E-8   | -7.695136986E-7 | -1.046260220E-5 | 1.007991763E-4  | 1.504102737E-3  | 0.937 |
|      | 50.3 GHz | -9.719755000E-10 | -5.926447850E-7 | -6.919085280E-6 | 8.717420005E-5  | 1.606814384E-3  | 0.954 |
|      | 89 GHz   | 9.655720500E-9   | -7.937490890E-7 | -7.742923322E-6 | 7.042279820E-5  | 1.289333513E-3  | 0.942 |
|      | 150 GHz  | -5.133028650E-8  | -2.682128908E-6 | 1.685106397E-5  | 2.342758189E-4  | -1.107190066E-3 | 0.950 |
| 16   | 23.8 GHz | -2.045692350E-8  | -1.154156919E-6 | 1.109639974E-5  | 1.375612759E-4  | -3.473590183E-4 | 0.955 |
|      | 31.4 GHz | -1.840489770E-8  | -1.104038068E-6 | 1.022023635E-5  | 1.161915090E-4  | -2.557844654E-4 | 0.953 |
|      | 50.3 GHz | -3.293084150E-8  | -1.183552973E-6 | 1.242333441E-5  | 1.467264120E-4  | -4.156189066E-4 | 0.965 |
|      | 89 GHz   | -1.600851400E-8  | -9.733592779E-7 | 8.411520848E-6  | 1.058626302E-4  | -3.734728710E-4 | 0.956 |
|      | 150 GHz  | 1.531621918E-7   | -2.216728741E-6 | -3.241020654E-5 | 2.270176860E-4  | 1.216174191E-3  | 0.958 |
| 17   | 23.8 GHz | -3.065106100E-9  | -9.874047630E-7 | 6.165425222E-6  | 7.679587883E-5  | -2.110260133E-4 | 0.964 |
|      | 31.4 GHz | 4.577735900E-9   | -9.992726072E-7 | 4.374000373E-6  | 6.599017159E-5  | -7.547997023E-5 | 0.959 |
|      | 50.3 GHz | -1.576020730E-8  | -8.113814599E-7 | 5.346073568E-6  | 7.232619590E-5  | -1.544343684E-4 | 0.976 |
|      | 89 GHz   | -1.298297480E-8  | -7.611158698E-7 | 5.422496778E-6  | 4.133903072E-5  | -2.877914533E-4 | 0.966 |
|      | 150 GHz  | 5.752397360E-8   | -2.085890056E-6 | -1.518812756E-6 | 1.087636802E-4  | -1.542978324E-3 | 0.983 |
| 18   | 23.8 GHz | 1.557635404E-7   | -1.296371562E-6 | -3.344859972E-5 | 4.575486079E-5  | 1.808310533E-3  | 0.969 |
|      | 31.4 GHz | 1.699712714E-7   | -1.427249267E-6 | -3.483735960E-5 | 5.506597243E-5  | 1.723591108E-3  | 0.956 |
|      | 50.3 GHz | 3.266981190E-8   | -5.814554120E-8 | -6.231707588E-6 | -1.013560521E-4 | 5.275761571E-4  | 0.964 |

|    |          |                 |                 |                 |                 |                 |       |
|----|----------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-------|
|    | 89 GHz   | 4.713074000E-10 | 3.008950507E-7  | 4.517031775E-6  | -1.142118062E-4 | -3.321625295E-4 | 0.942 |
|    | 150 GHz  | 8.183217000E-10 | -2.557435040E-6 | 1.229996736E-5  | 3.231329904E-4  | -2.143828578E-3 | 0.910 |
| 19 | 23.8 GHz | -1.286553200E-9 | -8.035390039E-7 | 3.231694839E-6  | 5.875479798E-5  | 1.670554749E-5  | 0.964 |
|    | 31.4 GHz | 9.168894000E-10 | -7.874863219E-7 | 2.907957438E-6  | 5.001019168E-5  | 2.918031568E-5  | 0.956 |
|    | 50.3 GHz | -1.396222050E-8 | -6.840445028E-7 | 2.320081207E-6  | 3.312514067E-5  | 8.662535369E-5  | 0.969 |
|    | 89 GHz   | -1.302491800E-9 | -7.045183691E-7 | 9.440376413E-7  | 6.402600413E-6  | -1.774945642E-5 | 0.951 |
|    | 150 GHz  | 5.771607580E-8  | -2.701924367E-6 | -7.805766240E-6 | 1.043149961E-4  | -2.429613239E-4 | 0.950 |